2010

ACADÉMIE DES SCIENCES

ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES

RÉDUIRE LES VULNÉRABILITÉS DES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES ET SOCIAUX

Sous la direction de
HENRI DÉCAMPS





Événements climatiques extrêmes

Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 29

Animateur : Henri Décamps

ACADÉMIE DES SCIENCES



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Rapports sur la science et la technologie

– *Sciences et pays en développement. Afrique subsaharienne francophone*
  RST n° 21, 2006.

– *La recherche spatiale française*
  RST n° 22, 2006.

– *L'épidémiologie humaine. Conditions de son développement en France, et rôle des mathématiques*
  RST n° 23, 2006.

– *La maîtrise des maladies infectieuses. Un défi de santé publique, une ambition médico-scientifique*
  RST n° 24, 2006.

– *Les eaux continentales*
  RST n° 25, 2006.

– *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?*
  RST n° 26, 2006.

– *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*
  RST n° 27, 2007.

– *Hormones, santé publique et environnement*
  RST n° 28, 2008.

Imprimé en France

ISBN 978-2-7598-0508-2

Académie des sciences

Rapport Science et Technologie

Le Comité interministériel du 15 juillet 1998, à l'initiative du ministre de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, a confié à l'Académie des sciences l'établissement du rapport biennal sur l'état de la science et de la technologie.

Pour répondre à cette demande, l'Académie des sciences a mis en place en son sein le Comité « *Rapport Science et Technologie* » (RST), chargé de choisir les sujets d'étude et de suivre les travaux.

Chaque thème retenu est conduit par un groupe de travail animé par un membre ou un correspondant de l'Académie, entouré d'experts.

Chaque rapport est soumis au Comité RST, à un Groupe de lecture critique, et à l'Académie des sciences.

Depuis 1999, vingt-huit rapports ont ainsi été édités et remis au ministre chargé de la Recherche.

COMPOSITION DU COMITÉ RST

Christian AMATORE
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'École normale supérieure, université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-François BACH
Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences – Professeur à l'université René-Descartes

François BACCELLI
Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique

Roger BALIAN
Membre de l'Académie des sciences – Conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique

Alain CARPENTIER
Vice-président de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Patrick CHARNAY
Correspondant de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

François CUZIN
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université de Nice-Sophia-Antipolis

Michel DAVIER
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Paris-Sud

Jean DERCOURT
Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences –
Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Henri DÉCAMPS
Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique

Christian DUMAS
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'École normale supérieure de Lyon

Pierre ENCRENAZ
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Marc JEANNEROD
Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Claude-Bernard

Jean-Pierre KAHANE
Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Paris-Sud Orsay

Bernard MEUNIER
Membre de l'Académie des sciences – Président-directeur général de Palumed

Paul-Henri REBUT
Correspondant de l'Académie des sciences – Conseiller scientifique auprès du Haut commissaire à l'énergie atomique

Jean SALENÇON
Président de l'Académie des sciences – Ingénieur général honoraire des ponts et chaussées – Professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École nationale des ponts et chaussées

Erich SPITZ
Correspondant de l'Académie des sciences – Conseiller du groupe Thales

Pierre SUQUET
Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au Centre national de recherche scientifique

Philippe TAQUET
Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Muséum national d'histoire naturelle

Alain-Jacques VALLERON
Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Christophe YOCCOZ
Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Collège de France

Coordination éditoriale :

Jean-Yves CHAPRON
Directeur du service des Publications de l'Académie des sciences, assisté de **Joëlle FANON**

AVANT-PROPOS

Jean Dercourt

Secrétaire perpétuel

Depuis une vingtaine d'années, les questions relatives à l'environnement et au développement durable font régulièrement l'objet de travaux de la part de l'Académie. Outre les nombreux numéros thématiques de la revue *Les Comptes Rendus*, on peut citer notamment les rapports suivants :

- *L'effet de serre et ses conséquences climatiques* (1990 et 1994, R. Dautray, Tec&Doc)
- *La pollution des nappes d'eau souterraines en France* (1991, C. Guillemin)
- *Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère* (1993, G. Mégie, Tec&Doc)
- *Biodiversité et environnement* (1995, A. Cauderon, Tec&Doc)
- *Impact de la flotte aérienne sur l'environnement atmosphérique et le climat* (1997, M.L. Chanin, Tec&Doc)
- *L'ozone stratosphérique* (1998, G. Mégie, Tec&Doc)
- *Contamination des sols par les éléments en trace* (1998, G. Pédro, P.H. Bourrelier, Tec&Doc)
- *Pollution atmosphérique due aux transports et santé publique* (1999, B. Tissot, P. Fillet, Tec&Doc)
- *Pollutions localisées des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés* (2000, M. Petit, F. Colin, Tec&Doc)
- *Études sur l'environnement : de l'échelle du territoire à celle du continent* (2003, P. Caseau, Tec&Doc)
- *Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes* (2003, L. Laubier, Tec&Doc)
- *Sécurité sanitaire et gestion des déchets quels liens ?* (2004, B. Tissot, G. Pédro, Tec&Doc)
- *Les eaux continentales* (2006, G. de Marsily, EDP Sciences).

En juillet 2007, l'Académie a organisé un colloque international sur le problème des événements climatiques extrêmes, qui fut à l'origine d'un numéro thématique de la revue *Les Comptes Rendus Geoscience* (Elsevier-Masson, 2008, tome 340, n° 9-10)[1].

À l'issue de ce colloque, il a également été décidé de préparer le présent rapport, qui a été élaboré en coordination avec deux autres ouvrages collectifs, à paraître en 2010 :

– *Démographie, climat et alimentation mondiale* (animé par Henri Leridon et Ghislain de Marsily) ;

– *Gestion des sols et services écosystémiques* (animé par Patrick Lavelle et Georges Pédro).

* * *

Un « événement » est un fait important. Dans le domaine de la géodynamique, on reconnaît les événements météorologiques relevant de la géodynamique externe et les séismes et tsunamis relevant de la géodynamique interne. Les événements externes sont tantôt brefs, de l'ordre de quelques heures (tornades, tempêtes), tantôt plus longs, quelques semaines ou quelques mois (inondations, vagues de chaud, de froid ou de neige). Dans ce rapport, seuls les premiers – événements météorologiques relevant de la géodynamique externe – seront présentés, les seconds ne seront cités que pour comparer les coûts des dégâts assurés par des entreprises ou des États. L'essentiel des événements météorologiques intervient dans des zones géographiques bien déterminées.

Les événements climatiques, comme tout ce qui concerne le climat, prennent en compte l'ensemble des relevés météorologiques pendant une période définie, fixée à 30 ans : ainsi, le climat actuel prend en compte les événements qui se sont produits entre 1980 et 2010.

Malheureusement, un néologisme est apparu : il qualifie de climatique un événement météorologique de plus forte intensité et expansion que la moyenne ; la durée des temps n'est pas prise en compte. L'usage simultané de ces deux mots est à la base de nombreuses incompréhensions scientifiques, surtout quand l'évolution temporelle est analysée.

* * *

Les écosystèmes sont au cœur de ce rapport, qui montre leur fragilité face aux événements extrêmes. La diversité des êtres vivants qui les constituent, leur comportement face au milieu physique, leur redondance, bref la biodiversité dans

[1] Voir la table des matières de ce numéro thématique en annexe 4 de ce rapport.

un biotope donné sont des facteurs de viabilité. Les événements extrêmes, en détruisant certaines espèces et en facilitant le développement d'autres, rendent difficile le retour à une situation initiale, voire gênent ou même interdisent la résilience. Il est donc important de bien connaître les paramètres qui modifient le biotope initial.

Par ailleurs, l'Homme est acteur dans les écosystèmes. L'accroissement des populations humaines d'une part et les progrès technologiques d'autre part font qu'il modifie les écosystèmes et les paysages. Les destructions provoquées par les événements climatiques extrêmes conduisent les hommes à substituer au milieu détruit un autre milieu, qu'ils considèrent comme leur étant plus favorable. Ces opérations peuvent aboutir à des perturbations biologiques majeures et porter atteinte à la biodiversité. Ainsi, des étangs sont asséchés, des forêts détruites, des rivières détournées ou rectifiées, etc. Le plus fréquemment, les dommages provoqués par les événements naturels ou anthropiques extrêmes nécessitent des restaurations des sols, des reconstructions des habitations, de nouvelles plantations, etc.

Tous ces travaux ont bien évidemment un coût : les événements extrêmes pèsent de plus en plus lourd dans les budgets des entreprises, des villes, des régions et même des États qui doivent décider soit de reconstruire soit d'innover et même de déplacer les sites détruits ou trop fragilisés. Deux chiffres établissent l'importance économique de ces opérations ; pour ne considérer que les biens assurés, rappelons que les 7 ouragans ayant balayé les côtes des États-Unis au cours de 15 mois consécutifs, ont coûté 120 milliards de dollars aux seuls assureurs, soit 3 fois le montant des remboursements des biens assurés lors des attentats du 11 septembre 2001. La croissance des coûts induits par les destructions d'origine météorologique compte ; cela tend à conforter, dans l'opinion, l'idée de l'accroissent de la violence des événements extrêmes.

Parmi les catastrophes naturelles les plus dévastatrices, sur les 35 les plus coûteuses couvertes par les assureurs, à un titre ou à un autre de 1970 à 2008, 27 sont des événements « climatiques », les 8 autres étant liées aux séismes. La prise en charge concerne tant les États que les particuliers. Cette comptabilité ignore le nombre de victimes et, en outre, les montants engagés concernent fort peu les pays les plus pauvres, faiblement et rarement assurés.

En France, il a été possible de mettre au point un système de prévision d'occurrence et de risques d'événements météorologiques qui tend à s'améliorer après chaque désastre, de façon à diminuer les pertes humaines et les dégâts matériels. Mais, pour autant, il convient de rester vigilants quant à notre capacité d'organisation et il est indispensable de maintenir un niveau de recherche de qualité en ce domaine.

De plus, l'étude des écosystèmes et les résultats obtenus peuvent faciliter d'une part les réparations des dégâts et d'autre part amoindrir la nocivité des travaux publics qui sont autant d'événements extrêmes voulus par l'Homme : l'établissement de barrages hydrauliques et leurs lâchers d'eau, l'urbanisation, etc.

Par ailleurs, des événements plus modestes peuvent affecter certaines zones sensibles et produire des destructions faibles mais répétées, ce qui, dans les pays en développement, crée de véritables trappes à pauvreté. Devant l'ampleur de ces dégâts, seule est prise en considération actuellement la nécessité de limiter la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, en réduisant l'accroissement global des températures. Mais ce n'est que très progressivement et très insuffisamment que la réhabilitation des trappes à pauvreté est amorcée. Des accords entre pays développés et pays en voie de développement sont recherchés dans les réunions internationales.

Pour faire le point sur l'ensemble de ces questions, ce rapport a le mérite de ne pas se limiter au champ strictement scientifique, mais d'intégrer également la dimension sociétale. Il présente sept recommandations pour progresser en ces domaines.

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateur

Henri DÉCAMPS	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Membres du groupe

Jean-Claude ANDRÉ	Correspondant de l'Académie des sciences – Directeur du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs)
Pierre AUGER	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche à l'Institut de recherche et de développement (IRD)
Paul-Henri BOURRELIER	Président du conseil scientifique de l'Association française pour la prévention des catastrophes naturelles (AFPCN)
Claude COMBES	Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université de Perpignan
Bernard DERRIDA	Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie
Lucien LAUBIER†	Correspondant de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université de Méditerranée
Katia LAVAL	Professeur à l'Université Pierre-et-Marie-Curie – Laboratoire de météorologie dynamique du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – UMR 8539
Yvon LE MAHO	Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Ghislain de MARSILY	Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'École nationale supérieure des mines de Paris
Michel PETIT	Correspondant de l'Académie des sciences – Président de la section scientifique et technique du Conseil général des technologies de l'informatique
Claudine SCHMIDT-LAINÉ	Membre de l'Académie des technologies – Directeur de recherche CNRS, Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et forêts (Cemagref)
Philippe TAQUET	Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)

Coordonnateur

Jean DERCOURT	Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Ont également participé à la rédaction du rapport

Sous-chapitre 3.1

Yves BIROT	Directeur de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) – Président du conseil scientifique de l'Office national des forêts (ONF)
Jean-Luc PEYRON	Ingénieur général du génie rural, des eaux et des forêts – Directeur du Groupement d'Intérêt public Écosystèmes forestiers (GIP ECOFOR)

Sous-chapitre 3.2

Bernard SEGUIN	Directeur de recherche – Unité Agroclim de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) – Avignon

Sous-chapitre 3.3

Sabine BARLES	Professeur des universités – Institut français d'urbanisme – Université Paris 8

Chapitre 4

Jean-Pierre BESANCENOT	Directeur honoraire du Centre national de la recherche scientifiques (CNRS) – Laboratoire Climat et santé – Faculté de médecine de Dijon

Sous-chapitre 5.1

Erwann MICHEL-KERJAN	Professeur à la Wharton School of Finance, University of Pennsylvania, États-Unis – Département d'économie, École polytechnique, France

Sous-chapitre 5.2

Stéphane HALLEGATTE	Chercheur en économie de l'environnement et en science du climat à l'École nationale de météorologie, Météo-France et au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired)
Patrice DUMAS	Chercheur associé au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired)

Chapitre 6

Véronique ANCEY	Chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) – Unité de recherche Pastoralisme
Mélanie REQUIER-DESJARDINS	Enseignant-chercheur au Laboratoire d'accueil méditerranéen en économie et sciences sociales (LAMES) – Centre international d'études supérieures et de recherche en science agronomique – Institut agronomique méditerranéen de Montpellier (CIHEAM-IAMM)

Auteurs des encadrés

Sous-chapitre 1.1

Agnès DUCHARNE — Chargée de recherche au CNRS – UMR Sisyphe – Université Pierre-et-Marie-Curie

Sous-chapitre 1.2

Philippe CIAIS — Directeur de recherche au CEA Laboratoire de Biogéochimie et écologie des milieux continentaux – Directeur adjoint au Laboratoire des Sciences du climat et de l'environnement – UMR 1572

Philippe PEYLIN — Chargé de recherche au CNRS Laboratoire de Biogéochimie et écologie des milieux continentaux – Laboratoire des Sciences du climat et de l'environnement – UMR 1572

Sous-chapitre 1.3

David KANIEWSKI — Enseignant-chercheur au CNRS Laboratoire d'Écologie fonctionnelle (Ecolab) – UMR 5245 CNRS – Université Paul-Sabatier

Élise VAN CAMPO — Directeur de recherche au CNRS Laboratoire d'Écologie fonctionnelle (Ecolab) – UMR 5245 CNRS – Université Paul-Sabatier

Sous-chapitre 3.2

Serge PLANTON — Responsable de l'Unité de recherche climatique au Centre de recherches de Météo-France

Chapitre 4

Jean-Claude MANUGUERRA — Responsable de la Cellule d'intervention biologique d'urgence à l'Institut Pasteur

Sous-chapitre 6.1

Yves LE BARS	Ingénieur général honoraire du génie rural des eaux et des forêts – Association française de prévention des catastrophes naturelles (AFPCN)

Sous-chapitre 7.1

Patrick LAGADEC	Directeur de recherche au Laboratoire d'économétrie de l'École polytechnique

Sous-chapitre 7.2

Denis KESSLER	Président-directeur général du groupe SCOR

Sous-chapitre 7.3

Constantin PONTIKIS	Laboratoire PHY-SEN – Université des Antilles et de la Guyane

Sous-chapitre 7.4

Roland NUSSBAUM	Directeur de la Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels (MRN)

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ

Notre planète est confrontée à des événements extrêmes de plus en plus dévastateurs. À une échelle mondiale, les 25 catastrophes les plus coûteuses pour le secteur de l'assurance entre 1970 et 2009 sont toutes survenues après 1987, et plus de la moitié d'entre elles depuis 2001. Sur ces 25 catastrophes, 23 étaient liées aux conditions climatiques.

La France n'est pas épargnée : les tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999 y ont provoqué 88 morts, privé 3,5 millions de foyers d'électricité et coûté plus de 9 milliards d'euros de dégâts (7 milliards d'euros aux assureurs). Quant à la canicule de 2003, elle a entrainé près de 15 000 décès surnuméraires du 1er au 20 août. La récente tempête Xynthia, avec ses ruptures de digues, a provoqué 53 morts, s'ajoutant à tant d'autres tragédies survenues dans des zones inondables, et nous interrogeant. Sommes-nous prêts par exemple à affronter une crue comparable à celle de 1910 dans le Paris de demain ?

Ces événements voient leurs effets exacerbés par des développements urbains imprudents, le surpeuplement des zones littorales, l'anthropisation des milieux naturels. Ils représentent de véritables « trappes à pauvreté » pour les pays les plus pauvres de la Planète.

Un réel besoin d'anticipation existe face à ces effets. Notre pays est-il prêt à y répondre ? Participe-t-il suffisamment aux actions internationales visant à réduire les risques de désastres ? Dispose-t-il d'une information scientifique appropriée ?

Nous devons nous préparer à des événements climatiques extrêmes plus dangereux, quelquefois inédits, dans le contexte actuel de changement climatique et de concentration des populations dans des zones à risque.

Trois messages émergent de ce rapport :

1. une maîtrise absolue du risque d'événements climatiques extrêmes est illusoire, et il n'est pas possible d'attendre une compréhension toujours à parfaire des mécanismes en jeu pour agir ;

2. nous ne pouvons pas continuer de nous contenter d'approches sectorielles face à l'interdépendance des risques liés aux événements climatiques extrêmes ;

3. un effort important et durable d'éducation du public, tout particulièrement des jeunes générations, s'avère indispensable pour une transformation des comportements.

Ces messages conduisent à formuler sept recommandations :

1. affermir la résilience des systèmes écologiques et sociaux face aux événements climatiques extrêmes : renforcer pour cela la biodiversité de ces systèmes, sur la base de partenariats internationaux ;

2. repenser la gestion de l'eau aux différentes échelles géographiques et politiques, pour mieux adapter la demande à la ressource dans les régions menacées par la sécheresse et mieux évaluer les risques dans celles susceptibles d'être inondées ;

3. améliorer la coordination entre les services administratifs, pour un système de prévention plus performant, capable de mobiliser suffisamment tôt les plans « canicule », « grand froid », « tempête »... tout en réduisant la probabilité de fausses alertes ;

4. redéfinir le rôle et la responsabilité des secteurs public et privé, y compris à partir d'initiatives européennes concrètes, pour développer des solutions de couverture financière mieux adaptées aux catastrophes à grande échelle ;

5. développer un ensemble cohérent de politiques visant :

   - à réduire la vulnérabilité et l'exposition au risque,
   - à faciliter la gestion de l'urgence,
   - à augmenter la capacité de l'économie à reconstruire ;

6. diminuer la vulnérabilité des populations des pays en développement aux événements climatiques extrêmes, en investissant davantage dans la sécurité alimentaire de ces pays, la réduction de la pauvreté et la préservation des écosystèmes ;

7. promouvoir des programmes de recherche fédérateurs :

   - sur les mécanismes responsables des extrêmes climatiques,
   - sur la régulation, la résilience et la récupération des systèmes écologiques et sociaux,
   - sur l'aménagement des territoires menacés.

L'introduction rappelle que les événements extrêmes sont caractérisés par une faible probabilité d'occurrence mais de fortes conséquences sur les systèmes écologiques et sociaux. Les événements extrêmes considérés sont essentiellement de nature climatique : tempêtes, inondations, vagues de chaleur ou de froid, cyclones, sécheresses prolongées.

Le premier chapitre souligne que les écosystèmes interagissent avec les événements climatiques extrêmes et assurent à leur égard des services de régulation et de protection essentiels. Ces interactions induisent des dynamiques complexes, marquées par des surprises, des effets en retour, des seuils critiques. La viabilité des systèmes écologiques face aux événements climatiques extrêmes est indissociable de celle des systèmes sociaux et ne peut ignorer l'intrication des tendances qui transforment déjà notre environnement, de l'augmentation de la population mondiale à la disparition des milieux naturels et au réchauffement climatique.

Le chapitre 2 rappelle que la biodiversité est une clé de la capacité adaptative des assemblages d'espèces en consolidant leur redondance, facteur d'atténuation des dommages occasionnés par les événements extrêmes, et leur flexibilité, facteur de réponse rapide et appropriée au caractère imprévisible de ces événements. Diverses observations confirment l'intérêt de la biodiversité des milieux naturels comme condition de protection vis-à-vis des événements climatiques extrêmes, notamment en zones riveraines côtières. Ce rôle de la biodiversité ne peut être compris sans partenariats à une échelle internationale pour développer un système rigoureux d'observations sur l'ensemble de la planète et des indicateurs fiables par lesquels mesurer les évolutions en cours.

Le chapitre 3 concerne les forêts, les cultures et les villes – trois systèmes écologiques et sociaux en forte mutation sous l'effet de changements climatiques, démographiques et environnementaux. La viabilité de ces systèmes conduit à privilégier l'économie de l'eau dans la gestion des systèmes forestiers, à diversifier les systèmes de culture et à développer une approche sociale de la gestion urbaine.

Le chapitre 4 évoque les questions liées à l'anticipation des problèmes de santé à propos des grandes vagues de chaleur et de froid, ainsi que des extrêmes pluviométriques et des cyclones tropicaux. Des adaptations comportementales et technologiques sont nécessaires, mais aussi une meilleure prise en charge sociale de la vulnérabilité aux événements extrêmes. L'organisation de systèmes performants d'alerte et de prévention est essentielle, de même que celle, toujours critique, des services d'urgence. L'émergence de maladies transmissibles dépend de tout un ensemble de conditions, certaines très localisées, dont il convient de tenir compte dans les modèles de prévision et les systèmes d'alerte précoce.

Le chapitre 5 préconise une véritable transformation du système de couverture financière en cette période de catastrophes à grande échelle, tant dans les pays de l'OCDE dans lesquels l'architecture d'assurance joue souvent un rôle important que dans les pays pauvres dans lesquels tout événement climatique extrême se transforme en tragédie humaine, interrompant par ailleurs toute croissance économique naissante. Modéliser l'impact macroéconomique des catastrophes naturelles implique une analyse des effets de court terme, des impacts indirects et des conséquences sociales des catastrophes. Il est primordial de prendre en compte les déséquilibres économiques préexistants, ainsi que la durée des périodes de reconstruction, elle-même liée aux capacités de production des économies touchées. La faiblesse des capacités de reconstruction enferme certains pays pauvres dans des trappes à pauvreté susceptibles de s'approfondir avec le changement climatique.

Le chapitre 6 souligne que la justice et l'équité exigent de réduire la plus grande vulnérabilité des pays pauvres aux variations climatiques, extrêmes ou non. Deux principes sont mis en avant pour une plus grande ambition dans la réduction de cette vulnérabilité : prévenir tout changement climatique dangereux et donner la priorité aux plus vulnérables. Des actions concrètes, impliquant les populations en place, sont en ce sens indispensables. L'exemple des sociétés pastorales sahéliennes illustre toute la complexité des problèmes soulevés. Ce chapitre évoque diverses actions en cours dans les pays du Sahel, ainsi qu'au Bangladesh.

Le chapitre 7 évoque la nécessité d'une vaste politique de formation et d'information en matière de sécurité publique face aux événements climatiques extrêmes. Cette politique suppose une association des opérationnels de terrain, des spécialistes des risques, des experts scientifiques et techniques, des gestionnaires de services publics et des réseaux collectifs. Elle suppose aussi des opérations de recherche et développement coordonnées au niveau international, et surtout une vision globale et partagée de la sécurité, incluant en très bonne place l'éducation et l'action humanitaire. L'objectif est d'acquérir une véritable aptitude à faire face de façon solidaire aux situations multirisques. Les encadrés attirent notamment l'attention sur les nouveaux défis et responsabilités en ce domaine et sur l'expansion de l'univers des risques.

La France n'est pas moins vulnérable que d'autres pays aux événements climatiques extrêmes. Elle doit renforcer ses capacités de prévention, de réponse et de résilience aux menaces, tant dans le cadre de politiques intégrées de gestion des risques de catastrophe, que dans celui de plans d'adaptation au changement climatique. Ce renforcement suppose le développement de systèmes de vigilance couvrant davantage de risques, à des échelles spatiales et temporelles élargies et bénéficiant, entre autres, d'avancées obtenues dans les domaines de la météorologie et de la santé. Il suppose aussi un aménagement du terri-

toire permettant de promouvoir la viabilité des systèmes écologiques et sociaux – donc d'enrayer l'érosion actuelle de la biodiversité. Ce renforcement requiert encore des solutions de couverture financière mieux adaptées pour gérer les aspects économiques de l'après-catastrophe, et inciter à la prévention. Il nécessite, enfin, un effort constant d'éducation des nouvelles générations et du public.

Notre vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes souligne la nécessité de mieux comprendre les mécanismes de la viabilité des systèmes écologiques et sociaux. Ceci passe par des programmes de recherche fédérateurs, s'appuyant sur des données de qualité, sur une validation des modèles climatiques et hydrologiques, sur l'intégration dans ces modèles des connaissances issues des sciences biologiques et des sciences humaines, sociales et comportementales. Investir dans de tels programmes s'impose à tous dans la perspective des événements climatiques extrêmes à venir.

RECOMMANDATIONS

L'importance des problèmes liés aux événements climatiques extrêmes est étonnamment sous-estimée compte tenu des chiffres dont nous disposons. La canicule d'août 2003 a entraîné près de 15 000 décès surnuméraires du 1er au 20 août, soit un excédent de 55 % par rapport à la mortalité attendue, et les tempêtes de 1999 ont occasionné, en France et dans le domaine forestier, une perte de plus de 9 milliards d'euros aux propriétaires, aux assureurs, à la société dans son ensemble et à l'État. À une échelle mondiale, les 25 catastrophes les plus coûteuses pour le secteur de l'assurance au cours des 39 dernières années sont toutes survenues après 1987, et plus de la moitié d'entre elles depuis 2001. Sur ces 25 catastrophes, 23 étaient liées aux conditions climatiques, avec des effets se prolongeant dans le temps : un an après les 140 000 morts ou disparus du typhon Nargis de mai 2008 en Birmanie, 350 000 personnes dépendaient encore de distributions gratuites de nourriture.

Certains objecteront que le nombre de catastrophes n'est pas plus élevé de nos jours qu'il y a plusieurs décennies, nos moyens modernes d'information et de communication les rendant simplement plus visibles. La vraie question n'est-elle pas ailleurs ? Les cyclones qui frappaient les côtes de Louisiane dans les années 1800, quel que soit leur nombre, s'abattaient sur des zones peu peuplées. Aujourd'hui, plus de la moitié de la population humaine vit dans des villes et le monde devrait compter 60 cités de 10 millions ou plus d'habitants en 2015, le plus souvent dans des régions côtières à haut risque, notamment en Asie et en Afrique.

La question de fond est de savoir quelles seront les conséquences, catastrophiques ou non, des événements climatiques extrêmes. Or, la croissance de la population humaine, de l'activité industrielle et plus généralement des valeurs exposées dans des zones à haut risque ne présage pas d'un avenir des plus calmes. Elle amène au contraire à l'idée d'une vulnérabilité accrue à des événements extrêmes – ou ressentis comme tels –, auxquels nous devrons toujours mieux nous préparer en toute conscience des limites de nos connaissances.

Ce rapport est issu d'une volonté de s'interroger sur des problèmes qui dépendent les uns des autres et ne se ramènent pas à la seule question du changement climatique, aussi importante soit-elle. D'autres questions au moins aussi graves de justice sociale et environnementale ne doivent pas être négligées. En ce sens, les événements climatiques extrêmes sont un exceptionnel révélateur de problèmes que nos sociétés ont à résoudre d'urgence aux différents niveaux nationaux et internationaux.

En métropole, les événements climatiques extrêmes auxquels notre pays est exposé sont sans doute moins intenses que par exemple aux États-Unis, en Asie du Sud, en Chine, dans les pays les plus pauvres d'Afrique ou dans ceux de l'extrême nord. Cependant, tout un ensemble de facteurs nous placent dans une perspective de grande vulnérabilité : notre organisation territoriale morcelée, des développements urbains imprudents, l'afflux des populations sur certains littoraux, l'anthropisation des milieux, la difficulté à organiser le débat public et la concertation. Et les départements et territoires d'Outre-mer, aux dimensions géographiques faibles, sont de véritables laboratoires des risques cumulés. Les événements climatiques extrêmes peuvent y être sévères et répétés.

Au niveau international, les inégalités se creusent entre les pays riches et les pays pauvres, ces derniers devenant de plus en plus vulnérables aux grands phénomènes planétaires actuels, qu'il s'agisse du changement climatique, de l'accroissement de la population humaine, de la disparition des milieux naturels et de l'accès à l'eau potable. Sur ce terreau, nombre d'événements climatiques extrêmes deviennent des catastrophes dont les répercussions économiques et politiques peuvent s'avérer incalculables : famines, épidémies, guerres, dictatures, exodes... Les événements climatiques extrêmes constituent alors de véritables trappes à la pauvreté car ils rendent impossible un développement soutenable, ce qui aura à terme et par effet de ricochet des effets importants sur les pays développés.

La France doit maintenant se mobiliser et passer à l'action concrète face aux événements climatiques extrêmes. Dans cette perspective, nous attirons plus particulièrement l'attention sur *trois messages clés* et *sept recommandations* susceptibles d'éviter à notre pays de se réveiller au lendemain de la prochaine catastrophe de grande ampleur en s'interrogeant sur les responsabilités des uns et des autres.

Trois messages clés

Les hésitations ne sont plus permises : les données scientifiques montrent qu'un nombre important d'événements jadis considérés comme exceptionnels, c'est-à-dire intenses et peu probables, se succèdent à un rythme qui paraît s'accélérer, avec des pertes humaines, financières et environnementales substantielles. L'heure est à la prise en compte, par nos hautes instances politiques et par nos entreprises, de la menace qu'un nombre croissant d'événements extrêmes se révèlent particulièrement déstabilisants et coûteux dans les prochaines années.

Dans ce contexte, la France est-elle préparée à faire face à de tels événements, du simple citoyen au plus haut niveau décisionnel du pays ? Participe-t-elle suffisamment aux actions internationales entreprises pour en réduire le

risque de désastres ? Dispose-t-elle de l'information scientifique nécessaire à une prise de décision éclairée ?

En réponse, trois messages clés doivent être soulignés.

1. Il faut agir d'urgence – Une maîtrise absolue du risque d'événements climatiques extrêmes est illusoire, et **il n'est pas possible d'attendre une compréhension toujours à parfaire des mécanismes en jeu pour agir**. Simplement, toute préparation aux risques climatiques doit être décidée en toute conscience des limites de nos connaissances scientifiques – *de ce que nous savons* et, aussi fondamentalement, *de ce que nous ne savons pas*[1]. Toute action visant à se préparer aux risques climatiques demande aussi la plus grande attention aux enseignements à tirer des erreurs commises lors d'autres événements extrêmes, quels qu'ils soient et où qu'ils se produisent.

2. Il faut agir globalement – Nous ne pouvons nous contenter d'approches sectorielles. Les problèmes posés par les événements climatiques extrêmes sont par définition transversaux et dépendent les uns des autres, d'une manière quasi-inextricable. Cette interdépendance des risques est une réelle menace pour la viabilité des systèmes écologiques et sociaux déjà affectés par des pertes de biodiversité, des détériorations des services écosystémiques, des concentrations humaines dans des zones à risques et le réchauffement climatique. De manière surprenante, l'interdépendance des risques est un élément peu reconnu, et nos approches de gestion des événements extrêmes restent souvent bien isolées les unes des autres.

3. Il faut agir ensemble – Les recommandations de ce rapport seront vaines si elles ne s'accompagnent pas d'un effort important et durable d'éducation du public, tout particulièrement des jeunes générations. Les comportements doivent en effet changer et seule une action éducatrice de longue haleine permettra des progrès substantiels à cet égard. De cet effort dépend une nécessaire vision globale et partagée de la gestion des événements climatiques extrêmes, ainsi qu'une véritable aptitude à faire face de façon solidaire aux situations multirisques auxquelles nous sommes de plus en plus confrontés.

Sept recommandations

Recommandation 1 – Affermir la résilience des systèmes écologiques et sociaux face aux événements climatiques extrêmes : renforcer pour cela la biodiversité de ces systèmes, sur la base de partenariats internationaux.

[1] Bracing for the unknown. (2009). Editorial, *Nature*, 459 (7244).

Se préparer aux événements climatiques extrêmes, c'est d'abord assurer la viabilité des systèmes socio-écologiques. Cette viabilité passe par une action d'envergure pour protéger la biodiversité – du niveau intra-spécifique à celui de l'organisation de l'espace au sein des paysages. De cette biodiversité au sens large dépend en effet l'aptitude des écosystèmes à la régulation du climat comme à la protection contre certains risques naturels. La protection de la biodiversité ne peut se concevoir que dans des partenariats internationaux tels ceux montés par le réseau d'observation de la biodiversité (GEO BON – *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network*)[2] pour suivre les changements de la biodiversité dans le monde à partir de données dispersées, encore à organiser. Cette protection suppose aussi l'élaboration d'indicateurs fiables par lesquels mesurer les progrès accomplis dans la réduction des taux de perte de biodiversité – une élaboration engagée dans le cadre de la Convention pour la Diversité Biologique (CDB)[3]. En fait, la biodiversité est un facteur essentiel de la résilience des systèmes écologiques et sociaux face aux événements climatiques extrêmes.

Recommandation 2 – Repenser la gestion de l'eau aux différentes échelles géographiques et politiques, pour mieux adapter la demande à la ressource dans les régions menacées par la sécheresse et mieux évaluer les risques dans celles susceptibles d'être inondées.

L'adaptation des systèmes écologiques et sociaux au danger des événements climatiques extrêmes ne peut ignorer l'intrication des tendances qui transforment notre environnement, tant local que global : l'urbanisation, le creusement des inégalités, la disparition des milieux naturels, le réchauffement climatique. Point focal de ces tendances, les conflits d'usage de l'eau, aiguisés par les sécheresses, ne trouveront pas de solution dans la seule gestion de la ressource, notamment par construction de retenues : ils impliquent aussi une limitation de la demande et une évaluation précise des risques. Par ailleurs, réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux aux effets des inondations exige une amélioration constamment renouvelée de la gestion de l'urgence et de la capacité à reconstruire *ex post*, par des politiques d'assurance, de partage du risque et de support aux acteurs affectés. La possibilité d'une aggravation des effets des événements climatiques extrêmes appelle un engagement des plus hauts niveaux de l'État pour développer les projets d'ingénierie, les systèmes d'alerte, les stratégies de préparation aux différentes échelles locales, nationales et internationales.

Recommandation 3 – Améliorer la coordination entre les services administratifs, pour un système de prévention plus performant, capable de mobiliser

[2]http://www.earthobservations.org/
[3]http://www.cbd.int/

suffisamment tôt les plans « canicule », « grand froid », « tempête »... tout en réduisant la probabilité de fausses alertes.

L'anticipation doit aller de pair avec la surveillance et l'intervention. Un système performant de prévision médico-météorologique devrait permettre de mobiliser suffisamment tôt les plans de réponse (canicules, grands froids, tempêtes...), en visant à la fois la prévention et la gestion du risque, notamment à travers l'organisation des services d'urgence. Les premières mesures en ce sens montrent leur efficacité : près de 4 400 vies ont été épargnées au cours de l'été 2006, par rapport à ce que l'on pouvait redouter compte tenu des températures observées. De nombreuses disciplines doivent aussi être convoquées, par exemple pour anticiper et gérer de manière coordonnée et rapide la propagation de virus (tel le H5N1 ou H1N1) : virologie, épidémiologie, entomologie, ornithologie, climatologie, zootechnie, modélisation, sans oublier les sciences humaines, sociales et comportementales. L'enseignement et le rappel des principes d'hygiène les plus élémentaires doivent être un souci constant.

Recommandation 4 – Redéfinir le rôle et la responsabilité des secteurs public et privé, y compris à partir d'initiatives européennes concrètes, pour développer des solutions de couverture financière mieux adaptées aux catastrophes à grande échelle.

Les années à venir risquent d'apporter un nombre croissant d'événements climatiques particulièrement dévastateurs sur des périodes de temps courtes (comme ce fut le cas ces dix dernières années), avec la possibilité de crises et catastrophes encore plus sévères. Chaque pays, et la communauté internationale dans son ensemble, doivent alors impérativement redéfinir le rôle et la responsabilité des secteurs public et privé, dans le but de développer des solutions de couverture financière mieux adaptées. La transformation du système de couverture financière est déjà lancée dans plusieurs pays, et un nombre croissant d'entre eux prend désormais conscience de l'intérêt de porter cette transformation au plus haut niveau décisionnel[4]. La France a l'expérience d'un système fondé sur une solidarité nationale où le prix de l'assurance ne dépend pas du niveau d'exposition aux risques. Ce système, qui n'incite guère à la prévention, protège des petits risques mais ne serait pas adapté à la nouvelle dimension des désastres, sauf à penser que l'État paiera. Il s'agit d'adapter ce système pour renforcer la responsabilité personnelle ; il s'agit aussi de le repenser dans un contexte plus international, par exemple par le développement de solutions alternatives de transfert de risques (ce qui requiert une meilleure quantification de l'exposition aux catastrophes).

[4]The White House (2007). *Economic Report of the President.* Council of Economic Advisors, Washington, DC.

Recommandation 5 – Développer un ensemble cohérent de politiques visant : 1) à réduire la vulnérabilité et l'exposition au risque ; 2) à faciliter la gestion de l'urgence ; 3) à augmenter la capacité à reconstruire.

Pour reprendre les termes du rapport 2008 du Haut Comité Français pour la Défense Civile, un pays développé ne peut s'offrir le luxe de l'impréparation aux événements exceptionnels, ni au plan économique, ni au plan social, ni au plan politique[5]. La préparation de la France aux situations de crise a fait l'objet d'importants travaux ministériels et interministériels. Les systèmes français de vigilance ont pour leur part de grands mérites, qu'il s'agisse des systèmes d'alerte de Météo-France ou des systèmes de veille sanitaire. Le problème de fond est celui d'une vision globale : une meilleure préparation aux crises de grande ampleur demande à la fois une plus grande lisibilité des réalisations visant à préparer aux risques dans leur ensemble, un regroupement des efforts et des institutions, une véritable aptitude à faire face aux situations multirisques. Compte tenu des systèmes de vigilance existant en France à ce jour, tout développement d'une vision globale de la sécurité à une échelle élargie placerait notre pays en pointe dans ce domaine de l'« *early warning* » – un sujet de préoccupation croissante au niveau international.

Recommandation 6 – Diminuer la vulnérabilité des populations des pays en développement aux événements climatiques extrêmes en investissant davantage dans la sécurité alimentaire de ces pays, la réduction de la pauvreté et la préservation des écosystèmes.

Les événements climatiques extrêmes exacerbent la variabilité de la production agricole, affectant lourdement les populations des pays les plus pauvres. Tout projet d'accord global sur les questions climatiques doit donner la priorité au développement de ces pays, en accroissant leur capacité à faire face à l'adversité, à prévenir les crises et les conflits, à décider des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. En Afrique notamment, il est primordial d'améliorer les politiques, les institutions et les technologies agricoles, d'affecter des moyens importants aux actions locales, de former et de sensibiliser à la gestion du risque. Coordonner les initiatives régionales est aussi une priorité, qu'il s'agisse de sécurité alimentaire, d'accès à l'énergie, de réduction de la déforestation, de gestion de l'eau ou des sols. Pour toutes ces raisons, il est de plus en plus urgent de mieux alimenter les fonds globaux d'aide aux pays les moins développés pour élaborer et mettre en œuvre de nouveaux modèles de développement[6].

[5]HCFDC (2008). Constats et propositions pour une vision globale de la sécurité. Rapport Défense Civile, Paris.

[6]Voir Patt A.G. *et al.* (2010). Estimating least developed countries' vulnerability to climate-related extreme over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0910253107

Recommandation 7 – Promouvoir des programmes de recherche fédérateurs 1) sur les mécanismes responsables des extrêmes climatiques ; 2) sur la régulation, la résilience et la récupération des systèmes écologiques et sociaux ; 3) sur l'aménagement des territoires menacés.

Un support fort de la recherche fondamentale sur les mécanismes physiques responsables des extrêmes climatiques est nécessaire. À ce jour, la compréhension des mécanismes pouvant conduire à ces extrêmes est encore parcellaire. Il convient de poursuivre l'effort de recherche afin d'augmenter notre capacité à mieux les anticiper. Il est aussi nécessaire d'approfondir la connaissance des impacts des extrêmes climatiques sur les systèmes écologiques et sociaux, ainsi que les mécanismes de régulation, résilience, et récupération de ces systèmes après le passage d'événements extrêmes. Nous avons à concevoir un nouvel aménagement des territoires, de l'urbanisation et de la construction. Et nous avons à mieux comprendre les mécanismes physiques, comportementaux et organisationnels de la vigilance, de l'alerte, des mesures immédiates de crise, des outils de suivi en temps réel, ainsi que du financement des dégâts causés par les événements extrêmes à venir. À l'évidence, de tels programmes ne sauraient être menés à bien sans une participation pleine et entière des sciences de l'homme et de la société.

Récemment, l'inondation due à la tempête Xynthia a créé, comme souvent en semblable tragédie, un admirable élan d'entraide et de solidarité. Elle a témoigné de l'efficacité des professionnels de la météorologie, du dévouement et de la générosité de ceux de la sécurité civile. Mais elle a aussi révélé combien nous devons améliorer notre aptitude à anticiper de tels événements dans toute leur complexité, à appliquer les textes législatifs et réglementaires existant, à inventer de nouvelles gouvernances, de nouvelles logiques d'aménagement des territoires. Réduire nos vulnérabilités aux événements climatiques extrêmes à venir exige de la constance, de la persévérance, de la ténacité. . . En ce domaine, l'oubli est notre pire ennemi !

SUMMARY

Our planet faces increasingly devastating extreme events. On a global scale, twenty-five of the most expensive disasters for the insurance sector since 1970 all happened after 1987. More than half of those occurred since 2001. Twenty-three of the 25 disasters have been linked to climatic conditions.

France has not been spared. The Lothar and Martin storms of December 1999 caused 88 deaths, cut off electricity to 3.5 million homes and cost over 9 billion Euros in damages (7 billion Euros to insurers). The heat wave of August 2003 led to an additional 15,000 deaths between August 1st and 20th. The recent hurricane Xynthia led to the death of 53 persons when sea walls collapsed. It was the latest in a string of tragedies hitting these flood prone areas. It forces us to examine this issue seriously: in the future, are we prepared to face a flood like the one of 1910 in Paris?

These events lead to disastrous consequences that are aggravated by unwise urban development, overpopulation of coastline areas and human impact on natural environments. Such events constitute poverty traps for the world's poorest countries.

Faced with such destructive effects, preparedness is crucial. Is France prepared to face such events? Does it contribute enough to international efforts aimed at reducing the risk of disasters? Does it have the necessary scientific data to make informed decisions? In the current context of climate change and high concentrations of populations in risk zones, we must be prepared for more dangerous, and even previously unknown, extreme climatic events.

Three key messages are highlighted in this report: 1) reaching absolute certainty about the risk of extreme climatic events is an illusion and it is not possible to wait to have perfect knowledge of their mechanisms before acting; 2) we cannot satisfy ourselves with sectoral approaches in the face of the interdependence of hazards associated with extreme climatic events; and 3) a significant and sustained effort to educate the public, especially the younger generations, is crucial to promoting a behavioral change.

These messages lead us to put forward the following seven recommendations:

1. the resilience of ecological and social systems must be increased to brace for extreme climatic events. In order to do so, biodiversity and the diversity of social systems must be strengthened through international partnerships;

2. water management must be redefined at the various geographical and political levels to better adapt the resource to demand in regions threatened by drought and better assess risk in flood areas;

3. coordination between administrative services must be improved to build a more efficient prevention system that will activate "heat-wave", "severe cold" and "storm" plans sufficiently early while reducing the probability of false warnings;

4. the respective roles and responsibilities of the private and public sectors must be redefined, within the framework for instance of concrete European initiatives, in order to develop solutions for financial coverage that are specifically adapted to large scale disasters;

5. a coherent set of policies must be developed to decrease vulnerability and risk exposure, facilitate emergency management and increase the reconstruction capacity of the economy;

6. the vulnerability of populations to extreme climatic events in developing countries must be reduced by increasing food security, reducing poverty and preserving ecosystems in these countries;

7. unifying programs of research should be promoted to study the mechanisms responsible for climate extremes, their regulation, resilience and recovery of social and ecological systems and land use in threatened areas.

In the introduction, we define extreme events as referring to hazards having a low probability of occurring but significant effect on social and ecological systems. In this report, the extreme events considered are essentially natural and linked to the climate, such as storms, floods, heat and cold waves, hurricanes and prolonged drought.

The first chapter highlights that ecosystems interact with extreme climatic events and provide regulation and protection in the face of such events. These interactions induce complex dynamics, including feedback phenomena and tipping points. The viability of ecological systems in the face of extreme climatic events cannot be dissociated from that of social systems. We cannot ignore the complex trends already at work on our environment, from increasing world population to disappearance of natural environments and global warming.

Chapter 2 reviews how biodiversity is key to the adaptive capacity of species communities. It contributes to redundancy, a factor that attenuates the damages caused by extreme events, and to flexibility, which promotes rapid and

appropriate responses to the unpredictable nature of these events. Various observations have confirmed the need for biologically diverse natural environments as a prerequisite for protection against extreme climatic events, especially in areas in close proximity to coastlines. The role played by biodiversity can only be studied by establishing international partnerships to develop a rigorous global system of observation as well as reliable indicators to measure existing trends.

Chapter 3 concerns forests, agriculture and cities, three social and ecological systems strongly affected by changes in the climate, demography and the environment. To insure the sustainability of these systems, greater importance must be given to: water conservation in managing forest systems; diversification of agricultural systems; and the development of social approaches to urban management.

Chapter 4 discusses issues linked to preparation against health problems linked to severe heat and cold waves, heavy rains and tropical cyclones. Behavioral and technical adaptation is required, as well as, better social risk management to reduce the vulnerability associated with extreme events. Organizing efficient warning and prevention systems as well as emergency responses is crucial. The appearance of communicable diseases depends on a whole set of conditions; some of these may be highly local and must be taken into account by the prediction and early warning systems.

Chapter 5 recommends a complete transformation of the financial coverage system in our era of large-scale disasters both in OECD countries where the insurance system plays an important role and in poor countries where extreme climatic events become human tragedies that interrupt budding economic growth. Models of the macroeconomic impact of natural disasters involve the analysis of short-term effects, of indirect impacts and of the social consequences of catastrophes. Preexisting economic imbalances must be taken into account as well as the length of the reconstruction period, which is linked to the productive capacity of the economies affected. A weak reconstruction capacity will keep some poor countries in poverty traps that are likely to worsen with climate change.

Chapter 6 stresses that justice and equity require that the vulnerability of the poorest countries to all types of climate hazards, whether extreme or not, be reduced. To reach such an objective, two principles need to be followed: preventing dangerous climate change and giving priority to the most vulnerable. Initiatives involving local populations are also necessary. The example of Sahelian pastoral communities illustrates the complexity of this issue. The chapter describes several current actions in the Sahel and in Bangladesh.

Chapter 7 demonstrates the necessity for comprehensive training and information policies in matters of public safety against extreme climatic events. Such

policies presuppose cooperation among field personnel, risk specialists, scientific and technical experts and managers of public services and community networks. It also implies that research and development programs are coordinated at an international level and most importantly that there is a shared global approach to security that gives the greatest importance to education and humanitarian action. The objective is to acquire a real capacity to face collectively multi-risk situations. The boxed texts highlight the new challenges and responsibilities in this area and the expansion of risk-related fields.

France is just as vulnerable to extreme climatic events as any other country. It must increase its capacity for prevention, response and resilience to threats through integrated policies for disaster risk management as well as adaptation to climate change. This requires the development of monitoring systems covering more risks, on wider spatial and temporal scales that benefit from advances in meteorology and health sciences, among others. It also requires land management policies that promote the sustainability of ecological and social systems and that will stop the current erosion of biodiversity. Such increase scaling requires better-adapted financial solutions in order to manage the economic aspects of the aftermaths of disaster and to promote prevention. It also requires a permanent effort to educate the younger generations and the public.

Our vulnerability to extreme climatic events draws attention to the necessity for gaining better understanding of the mechanisms underlying the sustainability of ecological and social systems. Unifying research programs based on high-quality data, validated climatic and hydrological models, integration into these models of knowledge from the biological sciences, humanities, social and behavioral sciences are needed. Mobilizing for such programs is necessary for all in the face of the extreme climatic events to come.

RECOMMENDATIONS

The importance of issues related to extreme climatic events has been astonishingly underestimated considering the figures that we have at our disposal. In France, the heat wave of August 2003 led to an extra 15 000 deaths between August 1st and 20th, 55% more than would otherwise be expected. The storms of 1999 caused over 9 billion € in forestry damage to owners, insurers, society and the state. On a global scale, twenty-five of the most expensive disasters for the insurance sector in the last 39 years all happened after 1987. More than half of these occurred since 2001. Twenty-three of the 25 disasters have been linked to climatic conditions. Their effects can be long-lasting. One year after the Nargis typhoon of May 2008 in Burma, 350 000 persons still depended on free food distribution.

Some might say that the number of disasters is no higher today than a few decades ago and that they are just more visible because of today's more modern means of information and communications. Does the real issue lie somewhere else? The hurricanes that hit the Louisiana coastline in the 1800s, whatever their number, hit sparsely populated areas. Today, they would hit a major metropolitan area. Over half the human population lives in urban areas and the world will have 60 cities of over 10 million inhabitants by 2015, mostly located in high risk coastal areas, especially in Asia and Africa.

The fundamental question is what the consequences of extreme climatic events will be and whether they will be catastrophic or not. The increase in human population, industrial activities and valuable assets exposed in high-risk areas does not lead us to predict a calm future. On the contrary, we foresee an increase of our vulnerability to extreme events and we will need to better prepare ourselves to face climatic events keeping in mind the limits to our knowledge.

This report arose from the willingness to examine interdependent problems and not treat just the singular issue of climate change, in spite of its importance. Other issues such as social and environmental justice are just as important and must not be neglected. From this viewpoint, extreme climatic events have revealed the problems that our societies must solve urgently at different national and international levels.

Extreme climatic events to which the continental part of France is exposed to are doubtlessly less intense than for example in the United States, in Southern Asia, in China, in the poorest African countries and in northern countries. However, we are in a position of great vulnerability due to our parceled territorial organization, unwise urban development, high population densities along some

of our coastlines, human impacts on the environment and difficulties in engaging in public debate and consultation. Our overseas departments and territories, which are of modest geographic size, can suffer very severe extreme climatic events and are true laboratories for cumulated risks.

At the international level, the inequalities between rich and poor countries are widening. The poor are becoming more vulnerable to current global phenomena, in particular climate change, increasing population, disappearance of natural environments and access to water. In such a context, many extreme climatic events become catastrophes with countless economic and political consequences: famine, epidemics, wars, dictatorships and migration. Extreme climatic events are poverty traps that make sustainable development impossible and, by extension, also affect developed countries.

France must start mobilizing itself for concrete action against extreme climatic events. In this context, we put forward three key messages and seven recommendations that will help our country effectively respond to the next big disasters.

Three key messages

We can no longer hesitate. Scientific data show that a significant number of events that were once considered exceptional, that is classified as intense but with low probability, are now occurring with increasing frequency and considerable human, financial and environmental cost. Time has come for the highest political authorities and the business sector to take into account the threat posed by an increasing number of particularly destabilizing and costly extreme events.

In this context, is France, from the ordinary citizen to decision-makers at the highest levels of government, prepared to face such events? Does it contribute enough to international efforts to reduce the risk of disasters? Does it have the necessary scientific data to make informed decisions?

As a response to these questions, the French Academy of Sciences highlights three key messages.

1. Urgent action is required – Reaching absolute certainty about the risk of extreme climatic events is an illusion and **it is not possible to wait to have perfect knowledge of their mechanisms before acting**. Preparations to combat climatic hazards must be made with a full awareness of the limits of scientific knowledge – by taking into account *what we know* and most importantly *what we don't know*[1]. Efforts to prepare us for climatic hazards must be taken only

[1] Bracing for the unknown. (2009). Editorial, *Nature*, 459 (7244).

after careful review of the lessons learned from mistakes made during other extreme events, regardless of their nature and location.

2. Global action is required – We cannot satisfy ourselves with sectoral approaches. The problems posed by extreme climatic events inherently affect many sectors and are highly linked together in near inextricable ways. This interdependence of hazards is a true threat to the viability of ecological and social systems that are facing multiple hazards as a result of loss of biodiversity, deterioration of the services provided by ecosystems, high concentrations of humans in risk zones and global warming. Surprisingly, the interdependence of hazards is a hardly recognized factor and our approaches to managing extreme events remain isolated one from the other.

3. We must act together – The recommendations in this report will be in vain without a continuous effort to educate the public, especially the younger generations. Certain behaviors must change and only a long-term education effort will lead to substantial progress in this respect. Such an effort is absolutely needed to reach a badly needed shared global vision of extreme climatic events as well as a real capacity to face the increasing situations of multiple hazards with solidarity.

Seven recommendations

Recommendation 1 – Ensuring the viability of social and ecological systems in the face of extreme climatic events by reinforcing their biodiversity through international partnerships.

To prepare ourselves for extreme climatic events, we must first ensure the viability of socio-ecological systems. Viability requires large-scale action to protect biodiversity, from the species level up to that of landscapes and land management. Biodiversity taken in its widest sense has a crucial impact on the capacity ecosystems have in regulating the climate and protecting against natural hazards. Protecting biodiversity requires international partnerships such as those set up by the GEO BON network (Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network)[2] to monitor global scale changes in biodiversity from scattered data. To protect biodiversity requires the development of reliable indicators to measure progress towards a reduction in biodiversity losses, a task already underway within the framework of the Convention on Biological Biodiversity (CDB)[3]. Biodiversity is a crucial factor for the resilience of ecological and social systems in the face of extreme climatic events.

[2] http://www.earthobservations.org/
[3] http://www.cbd.int/

Recommendation 2 – Redefining water management at different geographical and political levels to better adapt the resource to the demands in regions threatened by drought and assess risks in flood areas.

The adaptation of social and ecological systems to the threat of extreme climatic events cannot ignore the connection between the trends that are already transforming our local and global environment: an increasing population, a widening of inequalities, the disappearance of natural environments and global warming. Thus, water use conflicts between several economic sectors, which will only get worse with future droughts, will not be solved solely through managing the resource, such as building reservoirs. Limiting demand and a precise evaluation of risks are also necessary. More generally, to reduce exposure and vulnerability of ecological systems to the impact of floods, it will be necessary to improve continuously the management of emergency response and increase the economic capacity for reconstruction afterwards through adequate insurance policies, risk sharing and support for the affected individuals and sectors. The prospect of worsening extreme climatic events calls for a commitment at the highest level of government to develop engineering projects, warning systems and preparedness strategies at the local, national and international scales.

Recommendation 3 – Improving coordination between administrative services to build an efficient prevention system capable of early mobilization in the face of heat waves, severe cold, storms and other climatic events with lower probability of false warning.

Anticipation must be associated with monitoring and intervention. Effective meteorological forecasting and medical preparedness systems will permit an early mobilization of response plans (to, for example, heat waves, severe colds or storms). The aim is to reach efficient prevention as well as management of the risks, in particular through the organization of emergency services. The first measures taken in France towards this goal have proven their effectiveness: close to 4,400 lives were saved during the 2006 heat wave compared to the numbers that might have been lost considering the temperatures that were recorded. Many academic disciplines, including virology, epidemiology, ornithology, climatology, zootechnics, mathematical modeling and human sciences, must be called upon, for example to anticipate and manage in a rapid and coordinated fashion the propagation of a virus (such as the H5N1 and H1N1 viruses). Education and awareness of the most basic hygiene principles must be a permanent concern.

Recommendation 4 – Redefining the respective roles and responsibilities of the private and public sectors, including those based on concrete European initiatives, to develop solutions for financial coverage that are specifically adapted to large scale disasters.

Future years will likely see an increasing number of highly destructive climatic events occurring in rapid succession (as was the case in the last 10 years), with possibilities of more severe crises and disasters. Every country, and the international community as a whole, must redefine the role and responsibility of the public and private sectors in order to develop appropriate financial responses to large-scale disasters. A transformation of the financial response system is already under way in several countries and an increasing number of countries are becoming aware of the importance of bringing it to the highest decision level[4]. France has a risk-sharing scheme based on national solidarity where the insurance premium does not depend on risk exposure. Such a system, which does not promote prevention, protects against small risks but is not adapted to the new dimensions of the disasters requiring the state to pay in the end. The French system should be modified to strengthen personal liability. It should also be redefined within an international framework to develop, for example, alternative solutions for risk transfer, an undertaking that requires better quantification of hazard exposure.

Recommendation 5 – Developing a coherent set of policies to 1) decrease vulnerability and risk exposure, 2) facilitate emergency management and 3) increase rebuilding capacity.

According to the 2008 Report of the French Committee for Civil Defense (*Haut Comité Français pour la Défense Civile*), a developed country cannot remain unprepared to exceptional events whether they are economic, social or political[5]. Much work has been undertaken at the ministerial and inter-ministerial level to strengthen France's preparedness for crisis situations. French monitoring systems have shown their merit, whether it is the meteorological warning systems of Météo-France or the health monitoring systems. The basic problem is that of a global approach to security. Much more must be done to make global preparedness to threats better understood, to end piecemeal efforts and the multiplication of institutions, and to acquire a true ability to face multiple hazard situations. Taking into account the monitoring systems that already exist in France, any development of a global approach to security would put our country at the forefront of research in early warning systems, which is becoming a topic of increasing preoccupation at the international level.

Recommendation 6 – Decreasing population vulnerability to extreme climatic events in developing countries by increasing food security, reducing poverty and preserving ecosystems in these countries.

---

[4]The White House (2007). *Economic Report of the President.* Council of Economic Advisors, Washington, DC.

[5]HCFDC (2008). Constats et propositions pour une vision globale de la sécurité. Rapport Défense Civile, Paris.

Extreme climatic events increase the variability of agricultural production and its impact on the populations of the poorest countries. All projects on global agreements regarding climatic issues must give the priority to the development in these countries, through increased aptitude to brace for disaster, prevent crises and conflicts, deciding on mitigation and adaptation measures to climate change. Especially in Africa, it is crucial to improve policies, institutions and agricultural technology as well as allocate sufficient means for local actions, educate and familiarize people with risk management. Coordinating regional initiatives on food security, access to energy sources, decreasing deforestation and water and soil management is also a priority. This is why it is increasingly urgent to make contributions to global funds to help the least developed countries elaborate and implement new models of development[6].

Recommendation 7 – Promoting unifying programs of research on 1) the mechanisms responsible for climate extremes, 2) regulation, resilience and recovery of social and ecological systems and 3) threats and land management.

Strong support for fundamental research on the physical mechanisms responsible for climate extremes is necessary. Today, our understanding of mechanisms that might be involved remains sketchy. Research efforts should be pursued to increase our capacity for advance warning and preparedness. Preparing for severe climatic events cannot be done without further pursuing research on the impact of extreme climatic events on ecological and social systems and research on the mechanisms of regulation, resilience and recovery of such systems after the occurrence of an extreme event. New approaches to planning land-use, urbanization and construction must be developed. We must also gain knowledge about the physical, behavioral and organizational mechanisms involved in alertness, warning, disaster emergency measures, real-time monitoring tools and financing required to cover the damage from future extreme events. Clearly, the humanities and social sciences must take a full part in such programs.

Recently, the flooding caused by the storm Xynthia led, as often happens when tragedies occur, to an admirable surge in solidarity and mutual aid. It demonstrated the efficiency of meteorologists and the dedication and generosity of civil defence workers. It has however also revealed how much we need to: improve our capacity to prepare for the full complexity of such events; apply existing laws and regulations; and, invent new regulatory and land-use models. To lower our vulnerability to extreme climatic events requires consistency, perseverance and tenacity. Regarding these events, forgetting is our worst enemy!

[6]Voir Patt A.G. *et al.* (2010). Estimating least developed countries'vulnerability to climate-related extreme over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0910253107

« Tous les éléments scientifiques dont nous disposons
jusqu'à présent démontrent que nous pouvons
nous attendre à des conditions météorologiques extrêmes
dans les années à venir. »

Mark Adams, Université de Sydney.

« Un événement isolé ne peut être indicatif
d'une tendance et il faut observer les choses
sur de grandes échelles de temps pour dégager
les influences du changement climatique. »

Laurent Terray, Cerfacs.

« . . . des extrêmes, il y en a toujours eu.
Ce n'est que si l'on observe une répétition
ou une augmentation de l'intensité des événements
– et on ne pourra le faire qu'avec le recul –
qu'on pourra dire qu'il y a quelque chose d'anormal. »

Jean-Pascal Van Ypersele, Université catholique de Louvain.

Propos recueillis par *Le Monde* du 11 février 2009 : « Sécheresses et tempêtes avivent le débat sur le climat »

« Ces mystères nous échappent ?
Alors tâchons, sur le mode citoyen, de les organiser,
de les apprivoiser, de déjouer ce qu'ils peuvent avoir de périlleux
à l'encontre du destin de l'humanité tout entière. »

Emmanuel Leroy-Ladurie, *Le réchauffement de 1860 à nos jours*,
avec le concours de Guillaume Séchet. Fayard, 2009.

INTRODUCTION

Ce rapport concerne des événements extrêmes, c'est-à-dire à faible probabilité d'occurrence mais à fortes conséquences sur les systèmes écologiques et sociaux concernés. Les événements extrêmes considérés sont essentiellement de nature climatique : tempêtes, inondations, vagues de chaleur ou de froid, cyclones, sécheresses prolongées.

Ces événements ont accompagné l'histoire de la vie depuis son apparition sur la Terre. Ils continueront à se produire, et il est vraisemblable que leur intensité s'accroîtra sous l'effet du changement climatique en cours. Comment réduire notre vulnérabilité à l'égard de ces événements et se protéger de leurs effets ? Cette question est à l'origine de ce rapport.

Les effets dont il s'agit de se protéger ne sont pas, loin de là, déterminés par le seul changement climatique, comme on le verra. La vulnérabilité des sociétés humaines aux événements climatiques extrêmes tient en effet : 1) à l'accroissement des populations dans des zones urbaines de plus en plus densément peuplées ; 2) à la situation de ces zones urbaines dans des régions souvent à risque – le long des montagnes, des cours d'eau, des rivages marins ; 3) à la dégradation des écosystèmes, suite à des décennies d'exploitation irréfléchie des ressources naturelles ; 4) au changement climatique lui-même.

Il s'agit donc de réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux à des événements extrêmes qui, pour les raisons indiquées ci-avant, ont toutes chances de devenir de plus en plus catastrophiques. La ruse du « catastrophisme éclairé » s'applique ici dans toute sa logique : agir en tenant ces catastrophes pour certaines, afin qu'elles ne se produisent pas (Dupuy, 2002). Dans cette perspective, se protéger des événements climatiques extrêmes demande des efforts : 1) pour harmoniser les dynamiques écologiques et sociétales dans les

systèmes socio-écologiques ; 2) pour améliorer la capacité de résilience de ces systèmes, notamment en protégeant leur diversité biologique ; 3) pour atténuer le changement climatique et pour s'y adapter.

Le titre de ce rapport appelle d'abord quelques définitions, et son thème quelques précisions. Qu'entendons-nous par *événement climatique extrême*, par *vulnérabilité*, par *systèmes socio-écologiques* ? Quels liens faisons-nous entre *événements climatiques extrêmes* et *changement climatique* ?

Événement climatique extrême – Le quatrième rapport annuel de l'IPCC (2007) précise : « un événement météorologique extrême est un événement rare en un lieu et à une époque de l'année. Les définitions de « rare » varient, mais un événement météorologique extrême est normalement aussi rare ou plus rare que le 10e ou 90e centile de la fonction de densité de probabilité observée [. . .]. Quand un événement météorologique extrême se prolonge, par exemple sur une saison, il peut être qualifié d'événement climatique extrême. . .« . Cette définition distingue les événements météorologiques et climatiques par leurs durées, ce qui n'est pas toujours aisé. Dans le cadre de ce rapport, nous regroupons sous le terme de climatiques des événements météorologiques tels que des inondations, des tempêtes, des vagues de chaleur, et des phénomènes climatiques tels que la sécheresse.

Un événement climatique extrême est donc un événement exceptionnel par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (température, force du vent, pluie. . .) sur un territoire donné. Ces valeurs peuvent survenir soudainement (un cyclone) ou s'étaler dans le temps (une sécheresse). Quant aux notions d'exceptionnel ou d'inhabituel, elles découlent de la courbe intensité/fréquence des événements, ou aléas, comme le suggèrent les gestionnaires du risque[1], à l'image des physiciens (encadré 1). Le risque extrême correspond alors à l'extrémité de la courbe intensité/fréquence des événements ou aléas, au-delà d'un aléa dit de référence.

Vulnérabilité. Cette notion rend compte de la capacité d'une personne ou d'un groupe de personnes à anticiper l'impact d'un risque naturel, à y faire face, à y résister, à s'en rétablir. Cette capacité est influencée par des facteurs sociaux, économiques, politiques et environnementaux agissant à divers niveaux. Elle est inégalement répartie dans une société, certains membres se révélant plus vulnérables que d'autres. Et les effets possibles d'un événement climatique extrême ne peuvent être compris indépendamment d'un contexte social, économique et culturel. C'est ce contexte qui détermine la nature catastrophique d'un événement extrême (Wisner *et al.*, 2004).

[1] http://www.afpcn.org

Systèmes socio-écologiques. Les systèmes sociaux et écologiques sont des systèmes fortement couplés et intégrés. Leur dynamique est non linéaire, difficilement prévisible. Le qualificatif de socio-écologique permet de dépasser le caractère arbitraire de la limite entre systèmes sociaux et écologiques, tout en soulignant l'appartenance des humains à la Nature (Berkes et Folke 1998)[2].

Événements climatiques extrêmes et *changement climatique.* Le lien paraît *a priori* évident : la montée du niveau des mers (changement climatique) rendra par exemple les populations côtières plus vulnérables aux fortes tempêtes (événements extrêmes). Il est toutefois difficile d'établir statistiquement des relations de cause à effet entre des événements isolés et des tendances à long terme, et il n'est pas possible d'attribuer directement tel événement extrême au changement climatique en cours. Le cas des cyclones est à cet égard typique de nos incertitudes actuelles (encadré 2).

D'une manière générale, les experts s'accordent sur l'idée d'une augmentation très probable des épisodes de vagues de chaleur avec le réchauffement moyen et d'un changement très probable des événements pluvieux intenses en diverses régions. Les tendances globales sont moins nettes en ce qui concerne les durées des sécheresses et les extrêmes liées au vent (IPCC, 2007). En fait, l'accélération du cycle de l'eau risque d'accroître la sévérité des inondations en diverses régions, de même que l'augmentation des températures moyennes risque d'accroître la sévérité des vagues de chaleur et des feux de forêt – ces phénomènes sont susceptibles d'augmenter la vulnérabilité des groupes sociaux et des secteurs économiques les plus dépendants de l'agriculture et de la foresterie.

Nos sociétés modernes sont d'autant plus vulnérables aux catastrophes liées aux événements climatiques extrêmes qu'elles ignorent la fragilité des écosystèmes dont elles tirent des services, et qu'elles n'assurent pas un partage équitable des richesses dans les socio-systèmes. Comment comprendre, et partant mieux gérer, cette vulnérabilité ? La réponse à cette question ne saurait ignorer les acquis récents de nos connaissances scientifiques. Ce rapport vise à analyser l'intérêt et les limites de ces acquis, en sept chapitres portant sur : la dynamique des écosystèmes (chapitre 1) ; les assemblages d'espèces (chapitre 2) ; le cas des systèmes socio-écologiques forestiers, agricoles et urbains (chapitre 3) ; les questions de santé (chapitre 4) ; d'économie (chapitre 5) ; de justice et d'équité (chapitre 6) ; de sécurité civile (chapitre 7). Les recommandations tirées de cette analyse sont précisées en tête de ce rapport, et mises en perspective en conclusion.

[2] http://www.resalliance.org

Encadré 1

Quelques modèles simples donnant lieu à des événements extrêmes

(Bernard Derrida)

Lorsqu'on observe une longue série d'événements et que l'on s'intéresse aux événements extrêmes, c'est-à-dire aux quelques événements les plus grands de cette série, deux situations très différentes peuvent se présenter :

1. Le rapport entre la taille de l'événement le plus grand et celle d'un événement typique de la série est faible, n'excédant pas quelques unités : par exemple, le rapport de taille entre l'homme le plus grand du monde et un homme pris au hasard n'excède pas un facteur 2. En conséquence la taille record observée pour un échantillon de quelques milliers d'individus sera très proche de celle observée pour un échantillon beaucoup plus grand.

2. Le rapport de taille entre l'événement le plus grand et un événement typique de la série est élevé, de l'ordre de plusieurs milliers ou beaucoup plus, et ce rapport augmente à mesure que la série s'allonge. Cette seconde situation apparaît dans de nombreux contextes (Newman 2005) : répartition des richesses dans une population, fréquence des mots dans un texte, taille des villes, intensité des guerres, effets destructeurs des catastrophes naturelles (inondations, séismes, avalanches...), répartition temporelle des extinctions des espèces. . . Dans tous ces exemples, la fréquence des événements observés décroît comme une loi de puissance de la taille avec un exposant α :

Fréquence $\sim$ [Taille]$^{-\alpha}$

Plus l'exposant α est petit, plus grande est la taille des événements extrêmes. On peut ainsi estimer la façon dont la taille de l'événement le plus grand augmente avec la longueur de la série. Pour une série 100 fois plus longue, la taille de l'événement le plus grand est multipliée par 10 quand $\alpha = 3$ alors qu'elle n'est multipliée que par 2,1 quand $\alpha = 7$. On peut montrer également que pour $\alpha < 2$, la taille de l'événement le plus grand d'une série devient comparable à la somme des tailles de tous les événements de la série : pour des catastrophes naturelles, l'effet dévastateur de la plus grande catastrophe serait ainsi comparable à celui de toutes les autres réunies.

Au cours des années 1960-1970, les physiciens ont développé une théorie, dite « des phénomènes critiques », qui leur a permis de comprendre qu'au voisinage d'une transition de phase du second ordre (comme par exemple la transition entre la phase aimantée et la phase non aimantée d'un matériau magnétique comme le fer lorsqu'on varie la température), les fluctuations ont une distribution en loi de puissance (comme celle des événements de

la figure 1b)[3]. Un des aspects les plus remarquables de cette théorie est la notion d'universalité, qui prédit que les exposants des lois de puissance observées ne dépendent pas des détails précis des systèmes considérés (par exemple de la nature chimique du fluide), et, de manière encore plus surprenante, gardent une même valeur quand on étudie des systèmes aussi différents qu'un fluide ou un aimant. Cette propriété d'universalité, largement validée par les études expérimentales, a amené les physiciens à s'intéresser à des modèles de plus en plus simplifiés de la réalité physique, avec l'espoir (récompensé dans le cas des phénomènes critiques) que ces modèles possèdent les mêmes comportements critiques que les vrais systèmes physiques.

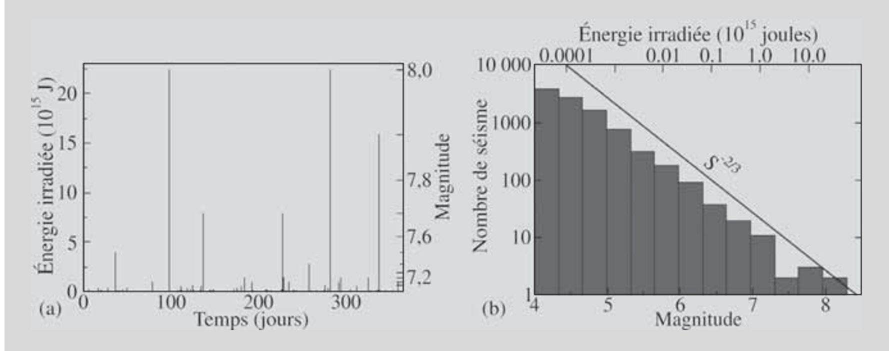


Figure 1
Séismes observés en 1995 : à gauche, amplitude en fonction du jour au cours de l'année ; à droite, fréquence des événements en fonction de leur amplitude. L'échelle sur la figure de droite étant logarithmique, la loi de puissance apparait comme une droite dont la pente est $\alpha \sim -2/3$ (Sethna, 2006).

Portés par les succès de la modélisation dans la théorie des phénomènes critiques, Bak (1996) et ses collaborateurs ont proposé une série de modèles très simplifiés, présentant une distribution d'événements en lois de puissance, sous le nom générique de criticalité auto-organisée. Leur motivation était que, comme pour les phénomènes critiques, des modèles même très simplifiés devaient posséder des comportements en loi de puissance avec des exposants identiques à ceux observés dans la nature. Leurs premiers modèles (Bak *et al.*, 1988) furent des modèles d'avalanches, dans lesquels des grains de sable sont déposés l'un après l'autre. Le plus souvent, l'ajout d'un nouveau grain ne fait pas bouger les autres grains dans son voisinage, mais les ajouts répétés rendent le tas de sable de plus en plus instable et, de temps en temps, l'arrivée d'un seul nouveau grain déstabilise toute la structure, provoquant une avalanche. Après cette avalanche, le système se retrouve

[3] Le physicien polonais Smoluchowski avait compris dès le début du XXe siècle que ces grandes fluctuations sont à l'origine de phénomènes comme celui de l'opalescence critique (ces grandes fluctuations de densité induisent de grandes variations de l'indice optique qui rendent le fluide opaque).

dans une configuration stable que l'ajout de nouveaux grains va petit à petit déstabiliser jusqu'à l'avènement d'une nouvelle avalanche et ainsi de suite.

Les amplitudes des avalanches de ce type de modèles (figure 2) ressemblent étonnamment aux amplitudes des séismes (figure 1) et toute une activité théorique s'est développée pour prédire les distributions en lois de puissance observées dans ces modèles de tas de sable. Bien d'autres modèles ont été étudiés par la suite pour modéliser les distributions en loi de puissance des séismes, des crashs boursiers, des feux de forêts, des extinctions d'espèces (Bak, Sneppen, 1993 ; Newman, Roberts, 1995). Dans tous ces modèles, l'évolution est très semblable à celle des avalanches des modèles de tas de sable : des périodes d'évolution lente, au cours desquelles l'état du système se déstabilise peu à peu, sont séparées par des avalanches d'amplitudes variables, distribuées en loi de puissance. Dans le cas de modèles d'espèces en interaction, ces périodes d'évolution lente, au cours desquelles peu d'espèces disparaissent mais où les écosystèmes deviennent de plus en plus instables, sont interrompues par des réorganisations plus importantes, où la disparition d'un petit nombre d'espèces dans un écosystème devenu instable entraine, par effet de cascade, l'extinction d'un grand nombre d'espèces.

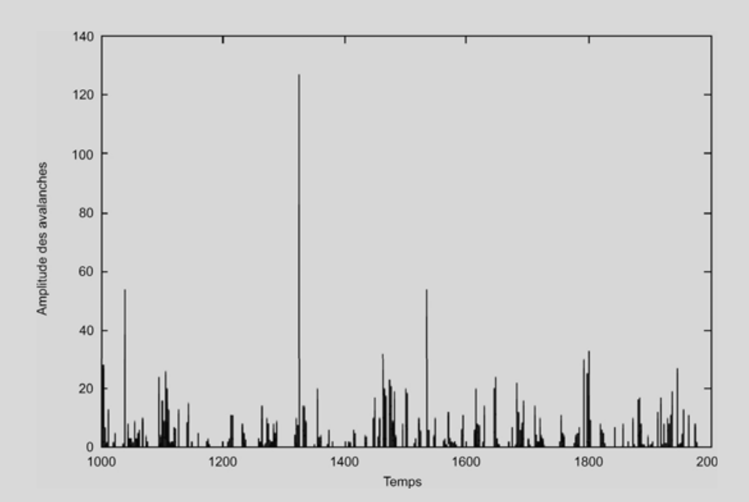


Figure 2
Le modèle de Bak et al. *(1988) : amplitude des avalanches en fonction du temps (Dhar, 1999).*

Bak P. (1996). *How nature works*. Springer.

Bak P. *et al.* (1988). Self-Organized Criticality. *Phys Rev A*, **38**: 364-374.

Bak P., Sneppen K. (1993). Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Phys Rev Lett*, **71**: 4083-4086.

Dhar D. (1999). Studying Self-Organized Criticality with Exactly Solved Models. Arxiv preprint cond-mat/9909009.

Newman MEJ. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics,* **46**: 323-351.

Newman MEJ., Roberts W. (1995). Mass-extinction: evolution and the effects of external influence on unfit species. *Proc Roy Acad Sc: Biol. Sc,* **260**: 31-37.

Sethna JP. (2006). Crackling Noise and Avalanches: Scaling, Critical Phenomena, and the Renormalization Group. Arxiv preprint cond-mat/0612418.

Encadré 2

Les cyclones tropicaux et le changement climatique
(Jean-Claude André, Cerfacs, Toulouse)

Les cyclones tropicaux sont parmi les phénomènes météorologiques les plus violents et les plus destructeurs, de par l'intensité des vents, des précipitations et, très souvent, des marées de tempête sur le littoral. Outre les dégâts considérables qu'ils peuvent ainsi produire lorsqu'ils abordent des zones habitées, ils sont à l'origine de perturbations écologiques très importantes. La question d'une possible relation entre l'activité cyclonique, particulièrement d'une augmentation de celle-ci, et le réchauffement climatique est donc d'une actualité et d'une importance extrême. Pour preuve les débats scientifiques récents, en partie initiés par une apparente augmentation de l'activité dans l'Atlantique Nord au cours de la décennie passée. Qu'est-il possible de conclure aujourd'hui ?

Les observations, directes et indirectes

Les données d'observation doivent porter sur de longues durées pour être interprétables en termes de rapport entre le « signal » (possibles variations en réponse au changement climatique récent) et le « bruit » (variabilité naturelle de l'activité cyclonique). Les données directes sont difficilement utilisables car affectées par une profonde rupture dans les conditions d'observation, liée à l'arrivée tardive de l'observation satellitaire dans les années 1970. Les données indirectes, *via* l'évaluation des dommages causés, sont quant à elles tout aussi récentes et, de plus, difficiles à débarrasser des effets liés à l'évolution de la démographie, de la richesse des zones exposées, des pratiques sociales, des méthodes de prévention, ... certains de ces facteurs tendant

à sous-estimer les variations d'activité, tandis que d'autres conduisent à les surestimer.

Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît donc que les observations, de nature soit directe, soit indirecte, ne permettent pas de répondre définitivement à la question d'une possible augmentation récente de l'activité cyclonique, en nombre comme en intensité, et que l'effet possible (le signal) reste probablement peu différent de la forte variabilité naturelle (le bruit). Il faut néanmoins souligner l'intérêt des nombreuses études actuelles qui tentent de mieux reconstruire l'activité cyclonique passée, que ce soit par utilisation d'archives ou par exploitation de proxys climatiques (par exemple l'ENSO[4]).

Les prédictions pour le futur

La seule autre voie pour tenter de répondre à la question est de simuler le climat futur à l'aide de modèles numériques avancés, simulations dans lesquelles les cyclones tropicaux sont, au moins en principe, représentés de façon aussi « résolue » et explicite (au sens de la résolution spatiale) que possible.

Nous disposons aujourd'hui de diverses simulations réalisées avec des modèles climatiques de résolutions horizontales différentes, mais jamais meilleures que 50 km pour les plus précises, pour des évolutions de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) suivant des scénarios soit relativement modérés, soit marquant une forte augmentation. Les résultats de ces simulations montrent que l'activité cyclonique simulée ne répond pas de façon continue au réchauffement climatique, en particulier à l'augmentation croissante de la température de surface de l'océan, qui suit celle de la concentration en GES. Ce résultat surprenant tient probablement à ce que la simulation climatique ne peut pas encore mobiliser la puissance de calcul nécessaire pour faire converger ses résultats en fonction de la maille spatiale utilisée. Cette convergence ne semble pouvoir être atteinte qu'avec des mailles 5 à 10 fois plus fines, soit des puissances informatiques 100 à 1 000 fois plus importantes[5].

Les prochaines années verront se réaliser des simulations du climat futur avec des résolutions spatiales suffisamment élevées (d'environ10 km) pour que leurs résultats soient interprétables de façon non ambiguë. Ceci sera très certainement l'élément nouveau majeur pour éclairer la question cruciale du futur de l'activité cyclonique.

André, J.-C. *et al.* (2008). Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *Geoscience,* **340**: *575*-583.

[4] *El Niño Southern Oscillation.*
[5] Le coût informatique croît comme au moins la puissance troisième de la résolution spatiale.

Références bibliographiques

Berkes F., Folke C. (Eds.) (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press.

Dupuy JP. (2002). *Pour un catastrophisme éclairé*. Paris, Le Seuil.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S. *et al.* (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Wisner B. *et al.* (2004). *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge. London et NewYork.

CHAPITRE 1

Écosystèmes et événements climatiques extrêmes

HENRI DÉCAMPS ET CLAUDINE SCHMIDT-LAINÉ

Les écosystèmes interagissent avec les événements climatiques extrêmes en assurant des services de régulation et de protection essentiels. Ces interactions induisent des dynamiques complexes, marquées par des surprises, des effets en retour, des seuils critiques. La viabilité des systèmes écologiques face aux événements climatiques extrêmes est indissociable de celle des systèmes sociaux ; elle n'est jamais définitivement acquise. On ne peut adapter les systèmes écologiques et sociaux à la menace d'événements climatiques extrêmes sans ignorer l'intrication des tendances qui transforment déjà notre environnement, de l'augmentation de la population mondiale à la disparition des milieux naturels et au réchauffement climatique.

Les écosystèmes représentent de formidables réservoirs de carbone à l'échelle de la planète. On estime à 730 gigatonnes (Gt) le carbone actuellement présent dans l'atmosphère. Or, l'océan stocke environ 40 000 Gt dont 2 500 sous forme de carbone organique, les sols en stockent 1 500 Gt, le permafrost plus de 900 Gt et la végétation 650 Gt. Ces réservoirs sont actuellement perturbés par l'activité humaine : d'une part l'utilisation des combustibles fossiles provoque l'émission d'environ 8 Gt de carbone par an dans l'atmosphère, et d'autre part la déforestation induit une émission nette d'environ 1,5 Gt de carbone par an (Canadell *et al.*, 2007).

La taille des réservoirs océaniques et continentaux est telle que des changements relativement faibles dans la dynamique de ces écosystèmes peuvent affecter lourdement la concentration en CO_2 atmosphérique. En retour, un paramètre clé de ces changements est la résilience des écosystèmes aux événements climatiques extrêmes – une résilience elle-même affectée par les grandes tendances actuelles : réchauffement climatique, accroissement de la population humaine, modification anthropique de la surface terrestre, en particulier diminution de la biodiversité.

Pour comprendre les réponses des écosystèmes aux événements climatiques extrêmes il faut prendre en compte une de leurs propriétés fondamentales, celle de se comporter en systèmes adaptatifs complexes (Levin, 1999), et s'attendre à des surprises, à des effets en retour, à des seuils critiques... Il faut aussi se souvenir que les écosystèmes assurent des services indispensables aux systèmes sociaux humains (MEA, 2005), eux-mêmes plus ou moins viables face à des perturbations de tous ordres.

1 | Surprises, effets en retour, seuils critiques

Trois exemples rappellent l'ampleur des transformations actuellement en cours de certains écosystèmes. Qu'il s'agisse des forêts de l'Amazonie, des récifs

coralliens ou du permafrost, des événements climatiques extrêmes risquent de frapper des ensembles déjà fortement modifiés. D'où des surprises possibles, des effets en retour, des franchissements de seuils critiques.

Les forêts de l'Amazonie. Une intense sécheresse a frappé l'Amazonie en 2005, en lien avec une élévation des températures de surface des eaux tropicales de l'Atlantique. Elle a diminué significativement le taux d'accumulation de biomasse forestière, suggérant que de tels épisodes peuvent réduire l'aptitude de la forêt amazonienne à se comporter en puits de carbone. Au total, l'impact de la sécheresse a réduit la biomasse des forêts tropicales de 1,2 à 1,6 gigatonnes de carbone (Phillips *et al.*, 2009). Cette vulnérabilité au stress hydrique peut affecter en retour le climat régional quand on sait que ces forêts stockent 120 Gt de carbone dans leur biomasse, et traitent 18 Gt de ce carbone annuellement par photosynthèse et respiration, plus de deux fois les émissions globales de combustibles fossiles. De telles sécheresses peuvent, outre leurs effets directs sur les peuples et la biodiversité, jouer un rôle non négligeable sur le cycle du carbone global.

Le blanchissement des récifs coralliens. Les récifs coralliens de la planète hébergent près de 9 millions d'espèces, dont 4 000 de poissons. Environ 100 millions de personnes en dépendent, essentiellement dans des pays en voie de développement, pour la pêche et le tourisme (Normile, 2009). Ces milieux exceptionnels sont cependant menacés par les activités humaines et les catastrophes naturelles : près de 19 % d'entre eux ont été détruits à l'échelle de la Planète et 15 % de plus pourraient être perdus dans les deux prochaines décennies[1]. En situation de stress, dû par exemple à des changements de température ou d'acidité des eaux, les coraux expulsent les algues unicellulaires photosynthétiques vivant en symbiose avec eux, ce qui les prive d'apports nutritifs indispensables et les décolore. Ce phénomène s'est produit plusieurs fois : en 1998 de la Polynésie française à la grande barrière de corail, affectant aussi les Maldives, l'Afrique et les Caraïbes ; en 2000 aux îles Fidji ; en 2002 à nouveau à la grande barrière de corail, en 2005 aux Caraïbes encore plus gravement qu'en 1998 (Walker et King, 2008).

Les coraux peuvent ainsi mourir si les eaux se réchauffent ou s'acidifient trop fortement ou trop longuement, sans pour autant disparaître : ils peuvent recoloniser des récifs désertés, s'installer en d'autres régions plus propices, ou même s'adapter... à condition que ne soient pas dépassés certains seuils de température et d'acidité. Or, ce dépassement risque de se produire avec le réchauf-

[1] D'après le *Status of the Coral Reefs of the World : 2008* (Wilkinson éditeur), traduit par F. Damien et B. Salvat (voir http://www.airesmarines.org).

fement climatique[2], d'autant plus que ces seuils critiques sont abaissés par une exploitation de plus en plus poussée de ces régions qui bouleverse les assemblages d'espèces récifales, notamment par eutrophisation des milieux, avec des effets en retour sur une économie développée autour des écosystèmes coralliens (Bellwood *et al.*, 2004).

La fonte du permafrost. Les sols gelés du permafrost recouvrent plus de 10 millions de km^2 en Alaska, au Canada, en Europe et en Sibérie, sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Ils représentent, on l'a vu, un réservoir de plus de 900 gigatonnes (Gt) de carbone en attente d'être libéré par dégel (Zimov *et al.*, 2006). Il est à craindre que le réchauffement climatique fasse fondre ces sols gelés qui, en retour, émettront un surplus de carbone sous forme principalement de méthane ou de CO_2 dans l'atmosphère, accélérant ainsi le réchauffement par une rétroaction positive. 60 à 90 % de la surface du permafrost pourrait avoir disparu en 2100 (Lawrence et Slater, 2005), selon les modalités de réchauffement des sols (atténuation éventuelle de ce réchauffement par des mousses et des lichens ou par de faibles épaisseurs de neige en hiver) et la nature des émissions de carbone (gaz carbonique ou méthane).

Cette fonte a déjà commencé, aux marges du permafrost comme dans les régions centrales plus froides, marquée par des trous d'effondrement des sols, des arbres déséquilibrés, des émissions de méthane à partir des lacs et des tourbières, le sapement des fondations d'immeubles, d'autoroutes et autres infrastructures, de l'Alaska à la Sibérie. Toute amélioration des prévisions passe par une meilleure connaissance de la biologie de ces sols, et de leur teneur en matière organique.

Ces exemples renvoient à la difficulté de prévoir les dynamiques écologiques.

2 | Résilience et viabilité

Les dynamiques écologiques ne sont exemptes ni de ruptures, ni de basculements ; elles peuvent soudainement devenir imprévisibles (Scheffer, 2001). En simplifiant, un écosystème lacustre passe ainsi d'un état oligotrophe (désirable) à un état eutrophe (indésirable), ou inversement, quand sa teneur en phosphore franchit les seuils de bifurcation qui séparent ces deux états alternatifs – des états de moins en moins résilients aux variations de teneur en phosphore en s'approchant des seuils de bifurcation (Carpenter *et al.*, 1999). Quel peut être l'effet

[2] Comme il s'est produit il y a 65 millions d'années lors d'une acidification fatale aux espèces dépendant de la présence de carbonate de calcium dans l'eau, y compris les coraux, dont on ne retrouve des traces fossiles que deux millions d'années plus tard.

d'événements climatiques extrêmes sur ces ruptures et basculements caractéristiques des dynamiques écologiques ?

L'exemple du lac soumis à un processus d'eutrophisation est souvent évoqué pour décrire les basculements entre des « états d'équilibres dynamiques ». Cette formulation ne doit pas induire en erreur : ces états sont tout sauf des états stables et il est faux de croire qu'un écosystème restauré après perturbation retrouverait une stabilité qui n'a jamais existé. Mais ceci n'interdit nullement de considérer comme désirables ou non désirables certains changements d'états ou de leur reconnaître des causes naturelles ou non. Maintenir un lac dans un état désirable revient à éviter une détérioration de la qualité de ses eaux tout en permettant, entre autres, une production agricole sur le bassin versant. Il s'agit donc de gérer un compromis pour assurer la viabilité d'un système socio-écologique (Guckenheimer et Holmes, 1983).

De tels systèmes peuvent être vus comme ouverts, autonomes, confrontés en permanence à leur environnement. Ils évoluent en modifiant cet environnement, par consommation de ressources et production de déchets, ce qui implique des « contraintes de viabilité », auxquelles ils doivent constamment s'adapter, au risque de disparaître en tant que tels (Aubin, 1991). Les états de ces systèmes – phénotypes en biologie, biens en économie, comportements des individus en sociologie... – évoluent en fonction de variables distinctes :

– commandes (*controls*) de tel ou tel paramètre ;

– *régulons*, tels que génotypes en biologie, prix en économie, codes culturels en sociologie ;

– perturbations (*tyches*) ou aléas imposés par la « Nature ».

L'ensemble des états à partir desquels une évolution satisfait au moins un ensemble de contraintes correspond à un « noyau de viabilité ». Quant à la résilience (Holling, 1973), elle peut être identifiée à l'intensité de la perturbation qu'une propriété du système peut supporter sans subir de changements qualitatifs (Beddington *et al.*, 1976). En considérant cette propriété comme un ensemble de contraintes, on peut associer à toute perturbation le coût de restauration de cette propriété, ce qui se ramène au calcul d'un noyau de viabilité. La résilience est alors évaluée comme l'inverse de ce coût (Martin, 2004).

La question fondamentale est ici de savoir comment maintenir les capacités de résilience et d'adaptation des systèmes écologiques et sociaux face à certains événements climatiques extrêmes, de manière à éviter des dérèglements supérieurs.

3 | Systèmes socio-écologiques

Les systèmes naturels et sociaux interagissent au sein d'ensembles complexes, caractérisés par un nombre élevé de composantes et un enchevêtrement de contraintes étalées dans l'espace et dans le temps (encadré 1.1).

Encadré 1.1

Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme[3]

(Agnès Ducharne[4] **et l'équipe RExHySS**[5]
UMR Sisyphe, Université Pierre-et-Marie-Curie/CNRS)

Le projet RExHYSS est ciblé sur les bassins versants de la Seine et de la Somme, tous deux soumis à un climat océanique, avec une influence significative des nappes souterraines sur les débits. Sur ces bassins, 12 scénarios climatiques s'accordent sur un réchauffement au cours du XXIe siècle, avec une baisse des précipitations, tant en moyenne estivale qu'en moyenne annuelle. Ces changements climatiques ont été interprétés par 6 modèles hydrologiques qui indiquent un assèchement prononcé des bassins étudiés d'ici à la fin du XXIe siècle. Le débit moyen de la Seine à son exutoire (Poses) pourrait ainsi baisser de 150 m^3/s, soit environ 28 % du débit moyen actuel. Les incertitudes autour de cette valeur sont d'environ 50 m^3/s et proviennent d'abord des modèles climatiques, puis des modèles hydrologiques. La baisse du débit moyen se répercute sur les hautes et les basses eaux, mais la réponse des valeurs extrêmes est plus contrastée, puisque les débits des étiages les plus sévères[6] baisseraient fortement, alors que les pointes de crue les plus rares[7] ne changeraient pas significativement. Ces changements du débit s'accompagnent d'une baisse significative des niveaux des nappes phréatiques, mais ces dernières seront aussi davantage sollicitées

[3] Voir aussi annexe 1.

[4] Coordinatrice du projet Agnes.Ducharne@upmc.fr

[5] Boé J., Bourqui M., Crespi O., Déqué M., Evaux J., Gascoin S., Habets F., Hachour A., Leblois E., Ledoux E., Lepelletier T., Maisonnave E., Martin E., Moulin L., Oudin L., Pagé C., Perrier A., Ribstein P., Rieu J., Sauquet E., Terray L., Thiéry D., Viennot P.

[6] Débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être sous passé, et noté QMNA5).

[7] Débit journalier maximal annuel de fréquence décennale (ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être surpassé, et noté QJXA10).

pour répondre à une demande en irrigation accrue sous changement climatique, ce qui intensifierait la baisse des niveaux de nappe et des débits. Au vu des premiers résultats acquis sur la Beauce, où l'irrigation est actuellement la plus intense, nous pouvons d'ores et déjà nous demander si l'irrigation des grandes cultures restera viable au regard des autres usages de l'eau sur le bassin.

La sévérité des impacts hydrologiques simulés résulte de la conjonction du réchauffement et de la baisse des précipitations annuelles. L'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique, mais la baisse des précipitations annuelles que nous anticipons dans les bassins de la Seine et de la Somme représente la meilleure projection actuellement disponible, car convergente pour de nombreux scénarios de changement climatique correspondant à l'état de l'art (IPCC, 2007).

IPCC, Working Group I (2007). *Climate change 2007: the physical science basis*. 4th Assessment *Report*, Genève.

Ces systèmes socio-écologiques réagissent de manière souvent incertaine aux événements climatiques extrêmes, et la question se pose de savoir comment préserver leur viabilité face à ces événements. Suffit-il par exemple de préserver la biodiversité et de diversifier l'utilisation des ressources pour assurer la résilience de ces systèmes (Yachi et Loreau, 1999 ; Adger *et al.*, 2005) ? En fait, l'avenir des systèmes socio-écologiques dépend de tendances climatiques et technologiques elles-mêmes imprévisibles. Les décisions sont le plus souvent à prendre en situation d'urgence, sur la base de connaissances imparfaites et de ressources limitées. De plus, gérer la viabilité des systèmes socio-écologiques passe par la participation de parties prenantes distinctes, qu'il s'agit d'identifier et d'impliquer tant dans le choix des résultats à obtenir que dans les moyens d'y parvenir.

La viabilité des systèmes socio-écologiques face aux événements climatiques extrêmes en appelle ainsi à des règles particulières de gestion (Anderies *et al.*, 2006) :

1. ni les systèmes écologiques, ni les systèmes sociaux ne peuvent être gérés isolément ;
2. la viabilité des systèmes socio-écologiques ne s'acquiert qu'en sacrifiant des bénéfices à court terme au profit de bénéfices potentiels à long terme ;

3. la diversité des systèmes socio-écologiques les rend moins vulnérables aux crises, aux chocs et événements extrêmes de toute nature ;
4. cette vulnérabilité ne peut être éliminée, les stratégies permettant de la diminuer en certains domaines conduisant à l'augmenter en d'autres ;
5. la gestion des socio-écosystèmes doit être revue continuellement au fur et à mesure qu'ils changent et qu'émergent de nouvelles vulnérabilités.

4 | Services écosystémiques

Parmi les services assurés par les écosystèmes (voir plus loin figure 3.1-1), ceux de protection et de régulation arrivent en tête dans une perspective de préparation aux événements climatiques extrêmes. Il est certes difficile de les séparer des autres services. Les mangroves servent par exemple de protection des côtes contre les crues, les ouragans et les grandes marées, et en même temps de nurseries et lieux de vie pour les crustacés et les poissons, de soutien des communautés côtières. C'est au regard de tout un ensemble de services que leurs disparitions totales ou partielles ont pesé, par exemple, sur les conséquences catastrophiques du cyclone de 2005 à la Nouvelle-Orléans.

Une attention particulière doit cependant être apportée aux services de régulation et de protection vis-à-vis des événements climatiques extrêmes, dans la mesure où ces derniers peuvent transformer tout écosystème, océanique ou terrestre, de « puits » en « source » de carbone (encadré 1.2). Les travaux récents laissent entrevoir un potentiel de séquestration du CO_2 probablement inférieur à celui estimé par les modèles actuels, et un effet d'amplification du changement climatique d'autant plus fort que le risque d'événement extrême est pris en compte (Heimann et Reichstein, 2008). D'où l'intérêt d'associer les spécialistes des risques dans la définition d'indicateurs de la sensibilité des écosystèmes à des perturbations (Chevassus-au-Louis, 2009).

5 | Atténuation et adaptation

Les événements climatiques extrêmes à venir surviendront dans un monde confronté au réchauffement du climat, à l'accroissement de la population humaine, à la réduction de la biodiversité : un défi sans précédent dans l'histoire de nos sociétés. Ce défi suppose d'agir dans l'urgence sur des socio-écosystèmes dont nous sommes parties prenantes et dont nous maîtrisons mal la dynamique. Nous avons à préserver la résilience et la viabilité de ces systèmes écologiques

et sociaux dans un monde de surprises, de seuils et d'effets en retour, sachant que tout événement climatique extrême peut affecter tout écosystème de manière soudaine et brutale, avec des conséquences durables pour les sociétés humaines (encadré 1.3).

Encadré 1.2

Impact des extrêmes climatiques sur la végétation : l'année 2003, un test en vraie grandeur pour l'Europe[8]

(Philippe Peylin, Philippe Ciais, laboratoire de Biogéochimie et écologie des milieux Continentaux, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement[9]

En 2003, l'occurrence simultanée de températures élevées et d'une forte sécheresse a eu un impact exceptionnel sur le fonctionnement de la végétation, ainsi que sur le cycle du carbone, à l'échelle de tout le continent européen.

Une baisse de la croissance des végétaux d'environ 30 % par rapport à la normale (moyenne 1998-2002) a été mesurée (Ciais *et al.*, 2005). En fait, la diminution de l'absorption de carbone par photosynthèse a devancé celle des émissions liées à la respiration, de sorte qu'en juillet-août, certains écosystèmes sont devenus des sources de CO_2 vis-à-vis de l'atmosphère, alors que cette saison correspond en moyenne à un puits maximal. Cette source de CO_2, définie comme une anomalie par rapport aux flux d'une année moyenne, a été estimée à 0,3 à 0,5 Pg C, soit une quantité équivalente au tiers des émissions européennes de CO_2 fossile annuelles par les transports, le secteur résidentiel et l'industrie !

Cette perte de CO_2 par les écosystèmes européens en été 2003 a annulé environ 3 à 5 années moyennes de séquestration. L'événement a induit des effets à plus long terme de dépérissement et de vulnérabilité accrue aux attaques de pathogènes (Granier *et al.*, 2007, Rouault *et al.*, 2006). Au-delà des forêts, une forte baisse des rendements agricoles a frappé particulièrement les cultures d'été comme celle du maïs, en dépit de la marge d'adaptation liée au choix des pratiques agricoles et des itinéraires techniques. Ces résultats sonnent comme un avertissement pour le futur, en ce qui concerne les limites de l'adaptation des écosystèmes et de leur gestion pour des conditions extrêmes.

Un événement climatique extrême comme celui de l'été 2003 a des conséquences apparemment plus importantes que celles qui pouvaient être

[8] Voir aussi annexe 2.
[9] Contribution du projet CarboFrance-GICC.

prévues sur les flux de CO_2 et le fonctionnement biophysique des écosystèmes. Les scénarios régionaux du changement climatique en Europe (Seneviratne *et al.*, 2006) montrent que de telles vagues de chaleur seront dans l'intervalle « normal » de variabilité en 2050. L'étendue des régions potentiellement affectées par des sécheresses d'été pourrait fortement augmenter, de la Méditerranée à l'Europe centrale et orientale. L'impact des extrêmes climatiques sur les écosystèmes terrestres fait actuellement l'objet de plusieurs programmes de recherche nationaux (projet « CarboFrance » du GICC) ou internationaux (projet « CarboEurope »). Ces projets sont cependant trop peu nombreux compte tenu des enjeux en cause.

Contribution aux recommandations : 1) mettre en place un suivi à long terme du fonctionnement de la végétation et de la réponse aux événements extrêmes, à l'aide de tours à flux, de mesures du CO_2 atmosphérique, ainsi que de données de télédétection spatiale et d'inventaires de biomasse ; 2) développer la validation et les performances d'outils de simulation numérique, aux échelles locale, régionale et continentale, afin de quantifier et de comprendre la réponse aux extrêmes climatiques des flux de CO_2, H_2O et énergie entre couverts végétaux et atmosphère ; 3) intégrer ces connaissances biophysiques dans les modèles de prévision du climat futur, afin de prendre en compte les rétroactions climatiques de la végétation sur le climat.

Ciais P. *et al.* (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**: 529-533 | doi:10.1038/nature03972.

Granier A. *et al.* (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, **143**: 123-145.

Rouault G. *et al.* (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of forest science*, **63**: 613-624.

Seneviratne SI. *et al.* (2006). Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, **443**: 205-209.

Encadré 1.3

Événements climatiques extrêmes et chaos social dans les sociétés antiques de Méditerranée orientale[10]

(David Kaniewski et Élise Van Campo, laboratoire d'Écologie Fonctionnelle (Ecolab), Toulouse)

Les fluctuations du climat ont largement influencé les stratégies d'occupation de l'espace des hommes du Néolithique, leurs stratégies de subsistance et l'évolution de leurs structures sociopolitiques. Les territoires qui bordent la Méditerranée orientale, berceau de l'agriculture dans le Croissant Fertile, ont ainsi vu se succéder de nombreuses civilisations.

Après 800 ans de climat relativement humide, les plaines côtières de la Syrie voient se succéder à partir de 1200 av. J.-C. des phases de sécheresse de plus en plus intenses, qui se prolongent sur plusieurs décennies, voire plus d'un siècle. En trois cents ans, les paysages de forêts claires se transforment en steppes et en déserts plus ou moins salés. L'installation progressive de l'aridité est ponctuellement interrompue par de courtes périodes de fortes précipitations, aux crues et aux inondations probablement dévastatrices. Parallèlement à l'évolution de l'environnement naturel, celle des pollens marqueurs de l'agriculture et de l'arboriculture (essentiellement céréales, vigne et olivier) révèlent une relation directe entre les périodes sèches et celles de faible productivité agricole, vraisemblablement génératrices de famines et de profonds désordres socio-économiques (Kaniewski et Van Campo, 2008).

En Méditerranée orientale, il apparaît clairement que des causes climatiques sont en grande partie à l'origine du chaos social et culturel des « Âges Sombres » qui marquent la transition entre Âge de Bronze et Âge de Fer. Les données archéologiques témoignent d'au moins deux phases successives d'invasions militaires et de mouvements de populations chassées par la disette et attirées vers des zones moins défavorisées, sur la côte ou à proximité de sites de résurgence d'eau douce locaux.

Les liens étroits entre bouleversements politiques et culturels et événements climatiques extrêmes au sein des sociétés antiques du Proche et Moyen-Orient ne permettent nullement de prédire les réponses possibles des sociétés actuelles qui occupent ces territoires aux évolutions futures du climat. Elles proposent néanmoins une réflexion sur la viabilité des sociétés complexes confrontées à une forte variabilité de leur environnement.

[10] Voir aussi annexe 3.

Contribution aux recommandations. Il est urgent d'anticiper la capacité des sociétés humaines à faire face aux risques environnementaux futurs, particulièrement dans les régions du monde les plus pauvres et les plus vulnérables. L'archéologie et l'histoire enseignent que les changements climatiques abrupts ont généré dans le passé plus souvent des phénomènes de rupture économique et culturelle graves que des stratégies adaptatives efficaces.

Kaniewski D. *et al.* (2008). Middle East coastal ecosystem response to middle-to-late Holocene abrupt climate changes. *PNAS,* **105**: 13941-13946.

La possibilité de changements abrupts consécutifs au réchauffement du climat n'est pas à exclure, avec des conséquences difficilement prévisibles à l'échelle de la planète (CCSP, 2008) : fonte rapide des glaciers et des calottes glaciaires élevant soudainement le niveau des mers, changements étendus et prolongés du cycle hydrologique, ralentissement de la circulation thermohaline de l'Atlantique Nord, libération rapide dans l'atmosphère du méthane piégé dans le permafrost et/ou dans les marges continentales. Nous avons à organiser des dispositifs de vigilance à l'égard de tels changements, quel que soit leur degré de vraisemblance.

Au-delà de cette vigilance, nous avons à parfaire nos connaissances pour adapter les socio-écosystèmes aux événements climatiques extrêmes. Les mesures d'adaptation sociétales sont connues, même si elles ne sont pas mises en œuvre avec l'ampleur souhaitable. Celles d'adaptation des écosystèmes doivent s'appuyer sur des connaissances encore à parfaire, notamment en ce qui concerne la biodiversité des assemblages d'espèces, objet du chapitre suivant.

Références bibliographiques

Adger WN. *et al.* (2005). Social ecological resilience to coastal disasters. *Science*, **309**: 1036-1039.

Anderies JM. *et al.* (2006). Fifteen weddings and a funeral: case studies and resilience-based management. http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art21/

Aubin JP. (1991). *Viability Theory*. Birkhäuser.

Bellwood DR. *et al.* (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, **429**: 827-833.

Beddington JR. *et al.* (1976). Concepts of stability and resilience in predator-prey models. *J Anim Ecol*, **45**: 791-816.

Canadell JG. *et al.* (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS*, **104**: 18866-18870.

Carpenter SR. *et al.* (1999). Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management. http://www.consecol.org/vol3/iss2/art4/

CCSP, Climate Change Science Program (2008). *Abrupt Climate Change*. Clark, P.U., A.J. Weaver (coordinating lead authors). Report U.S. Geological Survey, Reston, VA, 459 pp.

Chevassus-au-Louis B. *et al.* (2009). *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes, contribution à la décision publique*. Rapport Centre d'Analyse Stratégique.

Guckenheimer J., Holmes Ph. (1983). *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcation of vector fields*. Springer.

Heimann M., Reichstein M. (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, **451**: 289-292.

Holling C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Reviews Ecology and Systematics*, **4**: 1–23.

Lawrence DM., Slater AG. (2005). A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century, *Geophys Res Lett*, **32**, L24401.

Levin S. (1999). Fragile dominion. Complexity and the commons. Perseus publishing.

Martin S. (2004). The cost of restoration as a way of defining resilience: a viability approach applied to a model of lake eutrophication. http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art8/

MEA, Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press. Washington, DC.

Normile D. (2009). Bringing coral reefs back from the living dead. *Science*, **325**: 559-561.

Phillips OL. *et al.* (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, **323**: 1344-1347.

Scheffer M. *et al.* (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**: 591-596.

Stephens BB. *et al.* (2007). Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO_2 Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon. *Science,* **316**: 1732-1735.

Walker G., King D. (2008). *The Hot Topic*. Bloomsbury, London.

Yachi S., Loreau M. (1999). Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *PNAS*, **96**: 1463-1468.

Zimov SA. *et al.* (2006). Permafrost and the global carbon budget. *Science*, **312**: 1612-1613.

CHAPITRE 2

Assemblages d'espèces

HENRI DÉCAMPS

La biodiversité[1] confère aux assemblages d'espèces deux traits essentiels à leur capacité de résilience : la redondance, facteur d'atténuation des dommages occasionnés par les événements extrêmes, et la flexibilité, facteur de réponse rapide et appropriée au caractère imprévisible de ces événements. Diverses observations confirment l'intérêt de la biodiversité des milieux naturels comme condition de protection vis-à-vis des événements climatiques extrêmes, notamment en zones riveraines côtières. D'une manière générale, le rôle de la biodiversité ne peut être compris sans un système rigoureux d'observations sur l'ensemble de la planète et sans indicateurs fiables par lesquels mesurer les évolutions en cours. Ceci suppose le développement de partenariats à une échelle internationale.

Les assemblages d'espèces s'organisent en fonction de relations de coopération, de compétition et de prédation entre les espèces présentes. Ils s'organisent aussi au fil de perturbations d'origine extérieure, les unes de nature physique comme les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les changements climatiques, les autres de nature biologique comme les épidémies et les installations d'espèces exotiques. Les événements climatiques extrêmes figurent parmi ces perturbations. Les assemblages d'espèces y sont d'autant plus résilients qu'ils sont diversifiés. Ainsi, la diversité génétique des zostères a-t-elle été un facteur de rétablissement des populations de cette herbe de mer sur les bords de la Baltique après la canicule de 2003, avec des conséquences immédiates sur le maintien des communautés animales associées (Reusch *et al.*, 2005).

En fait, la biodiversité des assemblages d'espèces est liée à la variabilité climatique. Les oscillations de température et de précipitations, les régimes d'incendies, de crues, de sécheresses et de tempêtes ont régulé la taille des populations et la diversité biologique à diverses échelles d'espace et de temps. Au fil de leur évolution, les organismes ont acquis des traits qui leur ont permis de survivre, d'exploiter et même de dépendre de ces régimes de perturbations (encadré 2.1). Pour prendre l'exemple des rivières, les crues et les étiages, en empêchant une ou quelques espèces de proliférer, permettent que se maintienne une certaine biodiversité des assemblages d'espèces aquatiques et riveraines le long des cours d'eau. Cependant, ce « paradigme des régimes de débit naturels » (Poff *et al.*, 1997) fait référence à des événements qui, parce qu'ils sont prévisibles, peuvent exercer des pressions de sélection sur les traits d'histoire de vie des organismes aquatiques. Il en est autrement des événements extrêmes, – hors normes – qui sortent de ce domaine de variabilité éprouvé par certains assemblages d'espèces pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années.

[1] Diversité des organismes vivants qui s'apprécie en considérant la diversité des espèces, celle des gènes au sein de chaque espèce, ainsi que l'organisation et la répartition des écosystèmes (JO du 12 avril 2009).

Cette observation appelle plusieurs questions au sujet : 1) de l'adaptation aux événements climatiques extrêmes ; 2) des mécanismes permettant la survie des assemblages d'espèces ; 3) des réorganisations possibles de ces assemblages après destruction ; 4) de la réalité de leur rôle de protection ; 5) des moyens d'un suivi des changements de biodiversité. Nous évoquons rapidement ces divers points.

1 | L'adaptation aux événements climatiques extrêmes

Dire qu'une espèce est adaptée à son environnement signifie que ce dernier a affecté ses ancêtres par sélection naturelle : son génome reflète les ajustements réussis de ses traits d'histoire de vie à une variabilité prévisible des conditions ambiantes. C'est ainsi que le pic d'abondance des chenilles de telle espèce de papillon s'ajuste à la variabilité de la feuillaison des chênes ou que les éclosions des poussins de telle espèce de mésange s'ajustent à la variabilité de la prolifération des chenilles (Nussey *et al.*, 2005). Ces ajustements s'appuient sur des événements suffisamment communs pour avoir été déjà éprouvés. Or, les événements climatiques extrêmes sont rares et imprévisibles ; ils peuvent ne jamais avoir été éprouvés.

Dans ces conditions, comment certaines espèces ont-elles pu survivre aux catastrophes qui ont émaillé l'histoire de la vie sur la Terre (encadré 2.2) ? On peut penser que face à des conditions exceptionnelles jamais rencontrées, ces espèces ont survécu plus par chance que par adaptation. Mais il paraît aussi vraisemblable que certaines solutions adoptées pour surmonter des événements communs antérieurs prédisposent à trouver d'autres solutions pour faire face à des événements exceptionnels totalement inédits – pour faire face à l'imprévisible. C'est la thèse soutenue par Vermeij (2008) qui précise : « L'histoire de la vie – avec son extraordinaire diversité de solutions adaptatives, de lignées évolutives indépendantes, de circonstances variées et changeantes, et d'incertitudes – offre peut-être la source la plus prolifique de données d'où tirer des leçons pour faire face aux menaces à notre propre sécurité. »

Une de ces leçons est que ni les risques, ni les entités (individus ou groupes d'individus) soumises à ces risques ne peuvent être considérées isolément. L'adaptation à un type de risque peut favoriser des réponses à d'autres risques moins communs et plus sévères, et les interactions entre entités apparaissent souvent comme une condition de la résilience des assemblages d'espèces.

2 | Les mécanismes de la survie des assemblages d'espèces

Certains assemblages d'espèces ont survécu aux événements extrêmes qui ont marqué leur histoire depuis des millions d'années, y compris en se modifiant. On peut se demander par quels mécanismes et à quel prix, et tenter de s'inspirer de leur expérience pour se préparer aux événements climatiques extrêmes.

La redondance est par exemple le premier trait d'organisation susceptible de limiter les dommages occasionnés par des événements extrêmes. Elle permet, quand certaines parties d'un assemblage sont affectées, que d'autres, fonctionnellement identiques, prennent le relais et évitent un effondrement de l'ensemble. La redondance est ainsi source de robustesse face aux événements extrêmes ; elle crée une sorte de tolérance collective. *A contrario*, la dépendance d'une fonction à un seul élément d'un système expose ce dernier à un effondrement catastrophique quand cet élément disparaît. Cette évidence s'applique aussi bien aux infrastructures critiques et aux voies de transport et de communication qu'aux services rendus par les écosystèmes. Dans ce dernier cas, la biodiversité apparaît comme un facteur essentiel de redondance.

Un second trait intéressant est celui de flexibilité, qui permet des réponses rapides et appropriées à des événements imprévisibles dans l'espace et dans le temps. Ceci demande une organisation en parties semi-autonomes vis-à-vis des parties dominantes : les écosystèmes s'organisent ainsi à partir d'espèces comme les arbres ou les coraux qui offrent une structure tridimensionnelle aux autres espèces du système, ou comme les espèces clés de voute – top prédateurs ou herbivores – auxquelles les autres espèces s'adaptent en permanence par sélection naturelle (Vermeij, 2008). La flexibilité, la rapidité de communication, un contrôle local substantiel et des limitations au pouvoir de l'autorité centrale sont pareillement sources d'adaptabilité des sociétés humaines.

Au fond, les réponses des assemblages d'espèces font écho aux réponses qu'imposent à nos sociétés les chocs hors cadres évoqués plus loin dans ce rapport (voir encadré 7.1). Il faut encore souligner que, comme les assemblages d'espèces, les sociétés humaines seront toujours confrontées à des événements qui n'auront pas été prévus. Face à cette imprévisibilité, l'adaptation aux événements passés, même imparfaite, peut permettre une meilleure préparation aux événements à venir, y compris quand ils sont de nature inédite.

3 | La réorganisation des assemblages d'espèces suite aux événements climatiques extrêmes

Les populations végétales et animales en place réagissent différemment aux événements climatiques extrêmes. Certaines de ces populations disparaissent ou émigrent, d'autres sont affaiblies, quelques-unes sont renforcées. Ces différences conduisent à de véritables réorganisations des interactions entre espèces, comme on a pu l'observer dans les assemblages en milieu terrestre (Holmgren *et al.,* 2006) ou marin (Marques *et al.,* 2007).

Comprendre les modalités de ces réorganisations, dans toute leur complexité et dans leur variété, demande de longues périodes d'observation. Ainsi, trente années de suivi d'une communauté de rongeurs d'une région désertique de l'Arizona ont-elles été nécessaires à Thibault et Brown (2008) pour saisir comment une crue exceptionnelle, survenue en 1999, avait réorganisé les rapports entre les espèces de cette communauté, enclenchant de nouvelles dynamiques marquées par l'effondrement de l'espèce dominante et son remplacement par des espèces autrefois dominées ou écartées. L'espèce dominante pendant les 22 années qui ont précédé la crue de 1999 ne s'était pas encore rétablie dans ses prérogatives huit années après la crue, tandis qu'une espèce nouvellement installée sur le site en 1995 devenait dominante en 2000, puis était remplacée dans ce rôle par une troisième espèce en 2005.

De même, de longues périodes d'observation ont été nécessaires pour préciser comment les assemblages d'espèces, loin de correspondre à des équilibres durables, s'organisent au gré de bouleversements naturellement récurrents. Plusieurs travaux récents méritent d'être évoqués à cet égard. En Arizona, des sécheresses sévères ont provoqué le déclin de certaines plantes, leur remplacement par d'autres, et l'avènement de nouveaux assemblages, animaux associés compris (Miriti *et al.,* 2007). Aux Bahamas, l'ouragan Floyd, survenant après d'autres tempêtes, a renouvelé les interactions prédateurs-proies, différemment d'une île à l'autre, en transformant les modalités de dispersion (Schoener et Spiller, 2006). En Tanzanie, des sécheresses suivies de fortes pluies en 1994 et en 2001 ont affamé des buffles dont les carcasses infestées de tiques ont été dévorées par des lions affaiblis, aux défenses immunitaires abaissées par un virus habituellement non mortel, mais qui a aggravé la virulence d'un parasite transmis par les tiques des buffles (Munson *et al.*, 2008). En Norvège enfin, de nouvelles conditions d'enneigement ont pratiquement supprimé les légendaires pullulations de lemmings depuis une quinzaine d'années, réorganisant les réseaux trophiques des communautés animales sauvages de l'Europe du Nord, les prédateurs des lemmings, tels les renards, se tournant désormais vers d'autres espèces – oies sauvages et lagopèdes (Kausrud *et al.,* 2008).

Ces exemples indiquent clairement la nécessité de prendre en compte les interactions entre espèces, dans toute leur diversité, pour pouvoir prédire les effets d'événements climatiques, extrêmes ou non. Or, des groupes essentiels sont rarement pris en compte dans l'examen de ces interactions, particulièrement les microorganismes – bactéries et champignons – si importants dans les processus de décomposition, par exemple dans les sols des tourbières et du permafrost (voir chapitre 1). Ces milieux, avec leurs énormes stocks de carbone, peuvent modifier les concentrations en CO_2 atmosphérique sous l'effet des variations climatiques, avec d'importants effets en retour. Il est urgent de mieux comprendre les effets des événements climatiques extrêmes sur les assemblages bactériens et fongiques, et par suite la dynamique du carbone dans les écosystèmes, particulièrement dans les sols (Davidson et Janssens, 2006).

4 | L'évidence d'un rôle de protection

Les zones humides côtières réduisent les dommages provoqués par les ouragans en absorbant l'énergie des tempêtes mieux que tout autre type de milieu terrestre ou aquatique. Les plantes des marais retiennent et accumulent les sédiments, elles diminuent les effets de la houle et des vagues, et maintiennent de faibles profondeurs d'eau. Cette action protectrice des zones humides, évoquée mais contestée dans le cas du puissant tsunami de 2004 en Asie du Sud-Est (Kerr & Baird, 2007), est bien réelle en ce qui concerne les tempêtes. Elle a été suggérée par les observations accumulées après l'ouragan Andrew en 1992 en Louisiane et minutieusement démontrée dans le cas du cyclone qui a frappé la côte est de l'Inde en 1999 (Das et Vincent, 2009). Ce cyclone a tué près de 10 000 personnes, pour plus de 70 % emportées par la force du courant. L'étude précise et très complète de 409 villages de l'État d'Orissa, le plus touché, indique que l'existence de mangroves entre les villages et la côte s'est traduite par un moindre nombre de victimes recensées : trois fois plus d'habitants auraient péri en l'absence de ces forêts de mangrove. Même s'il est clair que les alertes précoces permettent de sauver davantage de vies, le rôle protecteur des mangroves justifie pleinement leur conservation, sans compter les nombreux autres services dont bénéficient les habitants riverains. Aux États-Unis, et pour le niveau actuel de tempêtes, les zones humides côtières fournissent une protection contre les ouragans estimée à 23,2 milliards de dollars par an (Costanza *et al.*, 2008). L'effet protecteur des assemblages d'espèces de mangroves, de récifs coralliens ou de zones humides est de plus en plus évoqué comme moyen d'éviter de nombreux dommages en biens et en vies humaines dans les zones côtières et insulaires soumises à des tempêtes et ouragans (Turner *et al.*, 2009).

En retour, cet effet protecteur ne s'exerce pleinement que dans des conditions de résilience de ces écosystèmes. Or, les mécanismes de la résilience des écosystèmes aux événements climatiques extrêmes dépendent de leur biodiversité. Les travaux actuels sur ce sujet montrent l'intérêt d'une égalité des abondances relatives entre espèces (Wittebolle *et al.,* 2009). Ils montrent aussi l'intérêt de la diversité des traits biologiques qui caractérisent les espèces en place (Royal Society, 2008). La question des traits biologiques dominants est en effet centrale dans une perspective de résilience aux événements climatiques extrêmes, comme le montrent les études de groupements fonctionnels (Diaz et Cabido, 2001) ou celles de complémentarité des traits au sein d'un assemblage (de Bello *et al.*, 2008). De telles études permettent de mieux comprendre le rôle de la biodiversité, et par suite les mesures de sauvegarde à mettre en place... Un effort de recherche particulier s'impose sur les assemblages microbiens du sol, essentiels dans nombre de processus écologiques clés. Il s'impose aussi, plus généralement, pour prévoir comment la biodiversité peut influencer les services – notamment de protection – assurés par d'autres écosystèmes, en d'autres zones que les zones riveraines côtières. Mieux comprendre le rôle de la biodiversité suppose enfin une approche socio-écologique (Carpenter *et al.,* 2009) : la biodiversité, les services assurés par les écosystèmes et le bien-être humain sont inextricablement liés, de manière complexe et variable. Ceci appelle une compréhension renouvelée de la dynamique des interactions entre la biodiversité et la résilience des socio-écosystèmes aux événements climatiques extrêmes.

5 | Suivre les changements de biodiversité

La biodiversité est une condition de l'aptitude des écosystèmes, qu'ils soient terrestres, marins ou d'eau douce, à la régulation du climat. Elle est aussi à l'origine de leur capacité de résilience face aux événements extrêmes et de l'atténuation que certains d'entre eux exercent vis-à-vis de ces événements. Cependant, le suivi des changements de la biodiversité se heurte au caractère fragmentaire et dispersé de notre information. Pour être utile, cette information doit être organisée, combinée, transmise... ce qui exige des partenariats internationaux pour une mise en réseau des informations disponibles. Le réseau d'observation de la biodiversité (GEO BON – *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network*)[2] repose sur un tel partenariat international. Beaucoup d'efforts existent en effet, aux niveaux local, national et international, pour rendre compte des diversités génétiques, spécifiques et écosystémiques, et les diversités de leurs services à la société. Il est indispensable de relier ces efforts, par exemple en combinant des mesures de l'intégrité des écosystèmes, obtenues par

[2] http://www.earthobservations.org/

satellites, avec des mesures de processus écologiques, de tendances populationnelles d'organismes clés, de bases génétiques de biodiversité, obtenues par des méthodes de terrain et de laboratoire (Scholes *et al.*, 2008). Le réseau d'observation de la biodiversité de GEO BON contribue ainsi à la collecte, la gestion et l'analyse des données sur le statut de la biodiversité mondiale.

Des partenariats internationaux sont aussi indispensables pour élaborer des indicateurs fiables par lesquels mesurer les progrès accomplis dans la réduction des taux de perte de biodiversité – une élaboration engagée dans le cadre de la Convention pour la Diversité Biologique (CDB)[3]. Il convient ici de suivre les changements de biodiversité, d'évaluer les impacts des politiques de gestion, d'identifier les tendances à venir et les priorités d'action. Tout ceci demande un ensemble rigoureux, pertinent et complet d'indicateurs de biodiversité (Walpole *et al.,* 2009). C'est ainsi que la CDB a adopté en 2002 un cadre de 22 grands indicateurs grâce auxquels mesurer les progrès vers une « réduction significative » du taux de perte de la biodiversité au niveau mondial à l'horizon 2010. Il est clair que cet ensemble d'indicateurs est loin d'être achevé, que des solutions doivent encore être trouvées en termes de disponibilité des données, de cohérence et de pertinence, que des lacunes existent quant à la couverture taxonomique et géographique de ces indicateurs. Cependant, la démarche est lancée et les progrès accomplis au sujet des espèces, par exemple dans le cadre de la liste rouge de l'UICN, permettent d'espérer d'autres progrès au niveau des gènes et des écosystèmes. Ces progrès dépendent aussi d'un choix d'indicateurs suffisamment sensibles pour détecter des changements significatifs, en particulier vis-à-vis des variations climatiques (Mace GM., Baillie JE., 2007 ; EEA, 2007 ; Gregory RD. *et al.*, 2009).

Contribution aux recommandations. Le bon usage de la biodiversité comme facteur de résilience des systèmes écologiques et sociaux aux événements climatiques extrêmes dépend de la manière dont nous saurons : 1) comprendre les interactions entre les événements climatiques extrêmes et la biodiversité à différentes échelles d'espace et de temps, en divers contextes socio-économiques et territoriaux ; 2) communiquer aux décideurs et au public les connaissances acquises sur la contribution de la biodiversité à la résilience des systèmes écologiques et sociaux, dans le respect de la complexité des interactions, des incertitudes et des interprétations. Ces objectifs supposent une information aussi précise et complète que possible, s'appuyant sur des systèmes d'observation cohérents et rigoureux et des indicateurs fiables des évolutions de la biodiversité.

[3]http://www.cbd.int/

Encadré 2.1

L'intérêt des adaptations à des « conditions extrêmes » (Christian Dumas)

Certaines espèces et assemblages d'espèces végétales présentent des caractéristiques physiologiques étonnantes d'adaptation à ce que nous considérons comme des conditions extrêmes. Il faut se garder ici de tout anthropomorphisme : dans les trois exemples ci-après, le feu, l'anoxie ou la sécheresse ne sauraient être considérés comme des événements extrêmes pour des espèces qui ont évolué afin de les tolérer. C'est au contraire, l'absence de feu qui, par exemple, représenterait un événement extrême pour les *Banksia*. Cependant, comprendre les adaptations de ces espèces à leur environnement peut aider à comprendre les mécanismes des réponses possibles à de futurs événements extrêmes.

1. Chez les *Banksia*, espèces arbustives appelées aussi « *fire trees* », le passage du feu est nécessaire à la libération des graines, emprisonnées dans des formations ligneuses résistantes ressemblant à des cônes correspondant aux fruits. Chaque fruit est un follicule renfermant un séparateur qui se gonfle après la pluie et permet l'expulsion des graines. Ces fruits éclatent en quelques minutes à 400 °C, temps correspondant au passage rapide d'un incendie.
2. Les palétuviers (*Rhizophora mangle*), espèces de la mangrove, forment des forêts littorales propres aux pays tropicaux. Ces espèces se sont adaptées à la vase et à la salinité, conditions qui diminuent la solubilité de l'oxygène nécessaire au développement des graines et des racines. Leurs racines-échasses portent des pneumatophores, structures assurant l'approvisionnement en oxygène du système submergé par des lenticelles et permettant le transfert du gaz des racines aériennes à celles immergées. De plus, ces espèces sont vivipares, phénomène très rare chez les plantes à fleurs : les graines germent sur la plante-mère et les jeunes germinations en forme de flèche s'en détachent pour se ficher dans la vase. Ce mécanisme autorise les premiers stades de développement à l'air.
3. Les plantes dites « de la résurrection » sont adaptées à des conditions de sécheresse extrême. Certaines persistent plusieurs années sans eau et développent des adaptations complexes leur permettant de minimiser d'éventuels dommages mécaniques, de maintenir une intégrité fonctionnelle et de réduire l'accumulation de radicaux libres. Parmi les éléments essentiels figure une vitesse de déshydratation lente nécessaire à la synthèse de molécules de protection. Si ce mécanisme est

assez général chez les mousses et les lichens, il est rare chez les plantes supérieures localisées plutôt dans certaines régions désertiques. Il en est ainsi les plantes-cailloux (*Lithops* sp) d'Afrique du Sud qui se réduisent à deux petites feuilles succulentes associées à une formation rocheuse particulière.

Un des aspects intéressants de ces adaptations aux environnements extrêmes est la grande richesse de ces plantes en protéines de stress (HSP, HSF) et en certains facteurs de transcription. Les études physiologiques ont aussi révélé des mécanismes particuliers leur permettant de réduire (ou d'interrompre transitoirement) leur métabolisme et de synthétiser des molécules de protection, en particulier au niveau des membranes biologiques (Smallwood *et al.*, 1999). Compte tenu de l'augmentation des surfaces en terres arides ou salées, des connaissances approfondies de ces espèces, notamment à l'échelle moléculaire, pourront permettre de créer des génotypes adaptés pour des plantes d'intérêt agro-économiques. La transgenèse est alors une clé possible à ce futur.

Contribution aux recommandations. Dans les régions à risques, une étude d'impact liée à l'importance de la végétation est indispensable. Par exemple, si les risques d'incendie sont avérés, faut-il laisser la Nature se reconstituer par elle-même (solution naturelle) ou bien doit-on modifier à l'extrême en éradiquant toute végétation susceptible de brûler ? Doit-on rechercher des pare-feux « naturels » (végétaux adaptés au feu, culture de la vigne, etc.) et tenter de limiter les incendies liés à l'homme ? Une réflexion est à conduire en ce sens.

Smallwood MF. *et al.* (1999). Plant responses to environmental stress. Bios, Oxford.

Encadré 2.2

Une vie mouvementée

(Philippe Taquet)

« La vie a donc souvent été troublée sur cette terre par des événements effroyables. »

Georges Cuvier

Discours sur les Révolutions de la surface du globe et sur les changements qu'elles ont produits dans le règne animal (1825).

Depuis que la vie est née et s'est épanouie sur notre planète au fil des millions d'années, son histoire n'a pas été, tant s'en faut, celle d'un long fleuve tranquille. Elle a au contraire alterné de longues périodes d'une évolution graduelle, au cours desquelles se sont différenciées de multiples formes vivantes animales et végétales, avec des épisodes de crises soudaines et catastrophiques responsables de l'extinction de nombreuses lignées.

C'est en constatant l'existence d'importantes ruptures dans le fil de l'histoire de la vie que le grand naturaliste Cuvier rédigea son *Discours sur les Révolutions de la surface du globe*. Aujourd'hui, les spécialistes du passé s'accordent pour admettre que la célèbre extinction des Dinosaures non-aviens à la fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années, a été causée par des événements climatiques extrêmes très probablement consécutifs à l'impact terrestre d'une météorite et/ou à d'importantes éruptions volcaniques.

L'histoire de la vie a été ainsi jalonnée de phases d'expansion de la biodiversité entrecoupée de ruptures et de diminution du nombre des espèces. Mais malgré ces événements qui ont perturbé son déroulement, la vie a toujours repris le dessus pour nous offrir aujourd'hui un éventail extraordinairement varié d'écosystèmes dont la complexité émerveille et fascine.

Parmi les perturbations susceptibles de se produire, on distingue trois types d'événements extrêmes :

La mortalité en masse, qui concerne des individus, des populations et qui agit sur une échelle locale ou régionale sans avoir de conséquences sur le nombre des taxas (espèces, genres ou familles). Elle est le résultat d'un événement limité dans le temps, à la suite d'une tempête, d'un tsunami, d'une inondation, d'une sécheresse, etc.

L'extinction en masse, qui se produit durant un intervalle de temps beaucoup plus long. Dans cet intervalle, le taux d'extinction pour des taxas comparables est sensiblement plus élevé que pour des intervalles de temps identiques antérieurs ou postérieurs à l'intervalle considéré. Cette extinction concerne des espèces, des genres, des familles ou parfois des ordres entiers.

L'extinction catastrophique, quant à elle, exerce son influence sur l'ensemble de la biodiversité. Elle touche tous les écosystèmes et se produit en un temps relativement bref à l'échelle géologique : de quelques années à quelques centaines de milliers d'années, voire un million d'années. Ces extinctions sont le résultat d'événements majeurs, planétaires, consécutifs à des éruptions volcaniques importantes, à des glaciations, à des régressions marines, à des effets de serre. Plusieurs grandes extinctions ont eu lieu dans le passé.

Au-delà de la découverte et de l'étude de ces événements extrêmes du passé se pose la question de l'analyse pertinente de leur déroulement : ainsi, un événement catastrophique s'est produit à l'Albien supérieur sur la plate-

forme saharienne, il y a 100 millions d'années ; il a laissé dans le même niveau sédimentaire et sur quelques centimètres d'épaisseur une multitude de restes fossilisés de poissons et de reptiles, du Maroc à l'Égypte, de l'Algérie au Niger. Cet événement a-t-il eu lieu en quelques heures, quelques jours, quelques années ? Il semble bien avoir été soudain et catastrophique, même s'il est aujourd'hui bien difficile d'apprécier ce qui a été continu ou discontinu dans ce lointain passé de la vie sur Terre (R. Hookyas, 1970).

À l'inverse, si nous pouvons analyser les événements climatiques extrêmes actuels tout en étant capables de juger de leur soudaineté ou de leur progressivité, nous manquons du recul nécessaire pour savoir si leur impact, leur force, leur répétition sont susceptibles d'avoir des effets temporaires, durables ou définitifs sur le cours de la vie qui nous entoure.

Au-delà de ces questions de définition, un point mérite d'être souligné : à l'inverse des Dinosaures qui ne purent échapper à leur sort et qui subirent une extinction relativement brutale, l'espèce humaine a fort heureusement la particularité et la capacité de pouvoir réagir et de s'adapter aux événements climatiques extrêmes qui sont susceptibles d'altérer son habitat, ses ressources alimentaires et son mode de vie.

R. Hooykas (1970). *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*. Éd. du Seuil. Paris.

Encadré 2.3

Mécanismes de thermo-tolérance chez les invertébrés

(Henri Décamps)

Comment les populations animales s'adaptent-elles à des stress thermiques ? Et avec quelles conséquences sur leurs dynamiques ? Ces questions ont fait l'objet d'un dossier récent de la revue *Functional Ecology* à propos des invertébrés (Angilletta, 2009).

Lors d'un réchauffement rapide, la performance de ces organismes dépend de leur capacité à protéger et modifier leurs structures cellulaires. Une brève exposition à une température élevée peut permettre, en quelques heures, une plus grande thermo-tolérance grâce à l'action de protéines de choc thermique qui empêchent les autres protéines de se dénaturer en présence de températures trop élevées ou trop basses. Au sein d'une même population de drosophiles, l'absence de production de protéines de choc thermique peut éliminer certains individus par perte de *fitness* en cas de fortes chaleurs (Sørensen *et al.,* 2009). Une forte corrélation existe par ailleurs entre

l'acquisition de la thermotolérance et l'expression d'une protéine de choc thermique chez des collemboles, mais la réponse peut se révéler trop lente pour des élévations rapides de température (Bahrndorff *et al.*, 2009).

En fait, la thermotolérance varie beaucoup selon les organismes. Les capacités de déplacement jouent aussi un rôle fondamental et, lors d'augmentations rapides de température, la sélection naturelle peut favoriser les individus les plus petits et les plus actifs comme le suggère l'étude d'invertébrés marins (Peck *et al.*, 2009). De plus, la thermo-tolérance est un phénomène complexe, la tolérance à la chaleur pouvant se traduire par une moindre tolérance au froid au cours du développement (Dixon *et al.,* 2009). En ce sens, les avantages des espèces généralistes – à large ampleur de tolérance thermique – risquent de se transformer en désavantages dans des environnements changeants.

Les événements climatiques extrêmes sont une des voies par lesquelles tout changement climatique oriente l'évolution des populations. Comprendre les réponses des invertébrés à « leurs » propres extrêmes actuels peut aider à comprendre quelles seront leurs réponses à de futurs événements climatiques extrêmes. Et les modèles reliant la thermotolérance aux dynamiques de populations ou aux répartitions géographiques peuvent éclairer les possibilités d'acclimatation ou d'adaptation dans un monde climatiquement plus variable.

Angilletta Jr. M. (2009). Looking for answers to questions about heat stress: researchers are getting warmer. *Functional Ecology,* **23**: 231-232.

Bahrndorff S. *et al.* (2009). Dynamics of heat-induced thermal stress resistance and hsp70 expression in the springtail, *Orchesella cincta. Functional Ecology*, **23**: 233-239.

Dixon A. *et al.* (2009). Relationship between the minimum and maximum temperature thresholds for development in insects. *Functional Ecology*, **23**: 257-264.

Peck L. *et al.* (2009). Animal temperature limits and ecological relevance: effects of size, activity and rates of change. *Functional Ecology*, **23**: 248-256.

Sørensen J. *et al.* (2009). Lessons from the use of genetically modified *Drosophila melanogaster* in ecological studies: Hsf mutant lines show highly trait-specific performance in field and laboratory thermal assays. *Functional Ecology*, **23**: 240-247.

Références bibliographiques

Carpenter S. *et al.* (2009). Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *PNAS,* **106**: 1305–1312.

Costanza R. *et al.* (2008). The value of coastal wetlands for hurricane protection. *Ambio,* **37**: 241-248.

Das S., Vincent JR. (2009). Mangroves protected villages and reduced death toll during Indian super cyclone. *PNAS,* **106**: 7357-7360.

Davidson EA., Janssens IA. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature,* **440**: 165-173.

De Bello F., Lavorel S., Diaz S. *et al.* (2008). *Functional traits underlie the delivery of ecosystem services across different trophic levels*. Report. http://www.rubicode.net/RUBICODE_Review_on_Traits.pdf

Diaz S., Cabido M. (2001). Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution,* **16**: 646-655.

EEA (2007). *Halting the loss of biodiversity by 2010: proposal for a first set of indicators to monitor progress in Europe*. European Environment Agency Report N° 11.

Gregory RD. *et al.* (2009). An indicator of the impact of climatic change on European bird populations. *PLoS ONE*, **4**: e4678.

Holmgren M. *et al.* (2006). Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Front Ecol Environ,* **4**: 87-95.

Kausrud KL. *et al.* (2008). Linking climate change to lemming cycles. *Nature,* **456**: 93-97.

Kerr AM., Baird AH. (2007). Natural barriers to natural disasters. *BioScience,* **57**: 102-103.

Mace GM., Baillie JE. (2007). The 2010 biodiversity indicators: challenges for science and policy. *Conservation Biology,* **21**: 1402–1413.

Marques SC. *et al.* (2007). Climate variability and planktonic communities: the effects of an extreme event (severe drought) in a southern European estuary. *Estuarine Coast Shelf Sci,* **73**: 725-734.

Miriti MN. *et al.* (2007). Episodic death across species of desert shrubs. *Ecology*, **88**: 32-36.

Munson L. *et al.* (2008). Climate extremes promote fatal co-infections during canine distemper epidemics in African lions. *PLoS ONE*, **3**: e2545. doi:10.1371/journal.pone.0002545

Nussey DH. *et al.* (2005). Selection on heritable phenotypic plasticity in a wild bird population. *Science,* **310**: 304-306

Poff NL. *et al.* (1997). The natural flow regime. *BioScience,* **47**: 769-784.

Reusch TB. *et al.* (2005). Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity. *PNAS,* **102**: 2826–2831.

Royal Society (2008). *Biodiversity-climate interactions: adaptation, mitigation and human livelihoods.* Report of an international meeting, June 2007: 52 p. http://www.royalsociety.org

Scholes RJ. *et al.* (2008). Toward a global biodiversity observing system. *Science,* **321**: 1044-1045.

Schoener TW., Spiller DA. (2006). Non synchronous recovery of community characteristics in island spiders after a catastrophic hurricane. *PNAS,* **103**: 2220-2225.

Thibault KM., Brown JH. (2008). Impact of an extreme climatic event on community assembly. *PNAS,* **105**: 3410-3415.

Turner WR. (2009). A force to fight global warming. *Nature,* **462**: 278-279.

Vermeij GJ. (2008). Security, unpredictability, and evolution: policy and the history of life, pp 25-41 *in* Sagarin R.D. & Taylor T. (Éds). *Natural security: a Darwinian approach to a dangerous world.* University of California Press, 289 p.

Walpole M. *et al.* (2009). Tracking progress toward the 2100 biodiversity target and beyond. *Science,* **325**: 1503-1504.

Wittebolle L. *et al.* (2009). Initial community evenness favours functionality under selective stress. *Nature,* **458**: 623-626.

CHAPITRE 3

Trois socio-écosystèmes

- **Écosystèmes forestiers européens face aux événements climatiques extrêmes**
- **Changement climatique et adaptation de l'agriculture**
- **Systèmes urbains et événements climatiques extrêmes**

Les forêts, les cultures et les villes représentent trois systèmes écologiques et sociaux en forte mutation sous l'effet de changements climatiques, démographiques et environnementaux à toutes les échelles d'espace et de temps. La viabilité de ces systèmes passe par une gestion adaptée aux événements climatiques extrêmes.

La prévision d'étés plus chauds, plus secs et plus longs sous nos latitudes conduit la gestion forestière à privilégier l'économie de l'eau. Les risques de dommages sont multiples, en fonction des modes d'utilisation des terres, de même qu'en fonction de l'usage fait des biens et des services de la forêt. Les stratégies de gestion peuvent appréhender l'ensemble de ces risques pour les grandes propriétés publiques ou privées, plus difficilement pour les petites propriétés.

La gestion des systèmes agricoles se préoccupe aussi de l'économie de l'eau. Diverses stratégies s'avèrent possibles : maintenir la croissance en privilégiant les organes essentiels pour la production, mettre en place des systèmes de culture et d'élevages plus économes en eau, diversifier ces systèmes de culture tout en assurant la rentabilité des systèmes alternatifs. L'action publique peut à la fois augmenter la ressource en eau et l'économiser en ajustant l'offre à la demande et la demande à l'offre.

La gestion urbaine des événements climatiques extrêmes exige une approche sociale de ces événements, ainsi que des métiers et institutions directement et indirectement impliqués. L'expérience acquise des catastrophes plus ou moins récentes invite à une bifurcation dans la trajectoire qui lie les sociétés et la biosphère. Il s'agit désormais d'aménager la ville non contre, mais avec la nature, aux trois temps des événements climatiques extrêmes et des risques associés – avant, pendant et après.

SOUS-CHAPITRE 3.1

Écosystèmes forestiers européens face aux événements climatiques extrêmes

YVES BIROT, JEAN-LUC PEYRON

Les forêts européennes (Russie exceptée) couvrent 193 millions d'hectares, soit 37 % en moyenne des terres émergées du continent. Leur surface s'accroît de 760 000 ha par an soit 0,4 % (FAO, 2007). Malgré leur anthropisation, elles sont plus proches de l'état naturel que d'autres écosystèmes et abritent une part importante de la biodiversité. S'interroger sur les risques encourus par les écosystèmes forestiers face aux événements climatiques extrêmes implique une prise en compte des biens et services qu'ils procurent (figure 3.1-1).

Les forêts d'Europe produisent 23 % du bois rond mondial pour une aire égale à 5 % des forêts de la planète. L'accroissement à long terme de la demande d'énergie entraîne à la fois un regain d'intérêt pour la biomasse ligno-cellulosique, un développement de la chimie verte et un avantage comparatif du bois matériau vis-à-vis de ses principaux concurrents qui requièrent en général pour leur extraction, leur transformation et leur mise en œuvre une grande

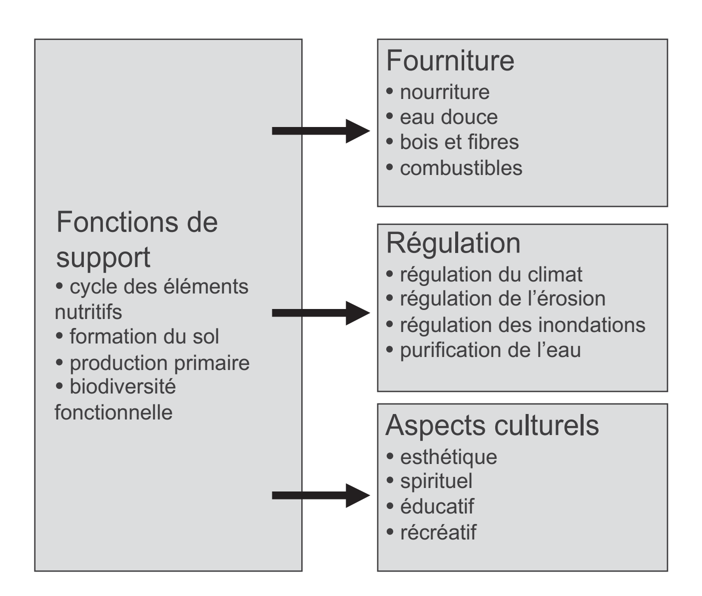


Figure 3.1-1
Services fournis par les écosystèmes forestiers (adapté d'après Millenium Ecosystem Assessment).

consommation d'énergie. Le stockage du carbone, de l'ordre de 20 milliards de tonnes tend aussi à s'accroître (Nabuurs *et al.,* 2003). Aujourd'hui, 19 millions d'ha de la forêt européenne sont consacrés à la conservation de la nature, et une surface équivalente à la protection (dunes, avalanches, sols, etc.) (FAO, 2007). Témoignent encore de l'importance de la forêt en Europe : le nombre de propriétaires forestiers (environ 12 millions), le nombre de citadins visiteurs par an (3,6 milliards selon l'UN-ECE, 2005), le nombre d'emplois directs et indirects dépendant de la forêt (environ 500 000 en France).

Les perturbations qui affectent les forêts européennes ont renversé ou détruit un volume de bois annuel de 35 millions de m^3 sur la période 1950-2000, soit 8 % de la récolte annuelle moyenne européenne et l'équivalent de la récolte annuelle française pour l'industrie. Les dommages sont dus pour l'essentiel aux tempêtes (53 %), incendies (16 %) et à des causes biologiques (16 % dont la moitié pour les insectes xylophages). Une large fraction des dommages, directs ou indirects, peut donc être attribuée aux événements climatiques, en particulier aux tempêtes et à la sécheresse. Mais les moyennes cachent d'importantes variations interannuelles, aux fortes conséquences socio-économiques.

Le réchauffement climatique devrait allonger la sécheresse estivale sous nos latitudes (IPCC, 2007), avec une fréquence accrue des sécheresses et des incendies, notamment en région méditerranéenne. La vulnérabilité des forêts augmentera du fait de leur extension en surface, d'un volume sur pied toujours plus

important (presque + 20 % de 1990 à 2005 d'après la FAO (2007)), et d'une hauteur dominante accrue (les arbres sont aujourd'hui plus hauts à âge égal).

1 | Impacts des perturbations sur les écosystèmes forestiers

Les perturbations naturelles constituent le mode normal de renouvellement des écosystèmes forestiers : les cyclones violents et fréquents ont modelé les écosystèmes forestiers de la Caraïbe, les feux de foudre ceux des forêts humides de la côte pacifique des États-Unis. En Europe, la régénération « normale » d'écosystèmes forestiers proches de l'état naturel se produit par des coups de vent qui affectent des bouquets d'arbres sénescents, mal enracinés ou dépérissants, créant de petites trouées dans le peuplement. Cependant, s'il se produit, l'accroissement de la fréquence ou de l'intensité des tempêtes affecterait profondément la dynamique des écosystèmes forestiers, et l'augmentation de la fréquence d'étés secs et chauds se traduirait inexorablement par des incendies de grande ampleur.

Les tempêtes comptent en effet parmi les événements climatiques extrêmes les plus destructeurs en forêt. Les graines du sol et celles issues des arbres semenciers du voisinage n'assurent une reprise des successions végétales qu'en trois à sept ans après tempête, dans des conditions où les essences pionnières n'entravent pas l'installation d'essences économiquement plus valorisables (Gauberville, 2005). La dynamique des communautés animales, par exemple de chevreuils, est notablement affectée par les tempêtes, non du fait de mortalités dues aux chutes d'arbres, mais parce que les chablis, par les ouvertures créées, augmentent la disponibilité alimentaire, dynamisant, au moins temporairement, les populations en surdensité par rapport aux autres (Duncan *et al.,* 2005). Quant aux oiseaux, les populations d'espèces rares et spécialisées, sédentaires comme migratrices, peuvent être durablement marquées par les destructions dues aux tempêtes (Thiollay *et al.,* 2005). Enfin, les insectes xylophages peuvent entraîner des dégâts considérables parfois de l'ordre de grandeur de celui des tempêtes, notamment les scolytes des conifères dont les populations peuvent infester des arbres sains à partir de bois abattus.

Les incendies de forêt sont aujourd'hui à plus de 90 % d'origine anthropique, les facteurs climatiques (vent, sécheresse, température) et les caractéristiques de la biomasse (combustible potentiel) jouant un rôle majeur dans leur développement. Les écosystèmes méditerranéens, façonnés par des feux pendant des millénaires, voient leur résilience remise en cause par les fréquences, intensités et ampleurs des feux des deux dernières décennies. Les grands incendies, outre

les pertes de vies humaines, contribuent fortement à la pollution atmosphérique (particules, ozone, mercure) dont l'impact sur la santé humaine mérite encore d'être précisé. Ils participent de façon très importante à l'émission de gaz à effet de serre et, dans les quelques années qui suivent leur occurrence, ont un impact majeur sur l'érosion des sols (processus dont la réversion est très lente), et sur le cycle hydrologique (augmentation des crues et des écoulements).

Les sécheresses et vagues de chaleur peuvent, par leur cumul, entraîner la disparition progressive d'une espèce comme le pin sylvestre dans le Var. Elles peuvent transformer les échanges forêt – atmosphère comme en 2003 en Europe (Ciais *et al.,* 2005 ; chap. 1 – encadré 1.2).

2 | Impact économique des événements extrêmes

2.1 Incendies

On a pu déplorer 14 morts et 800 millions d'euros de dommages par incendie de forêt au Portugal en 2005, et 64 morts et 2 milliards d'euros de dommages en Grèce en 2007. Les pays méditerranéens de l'Union européenne dépensent annuellement plus de 2,5 milliards d'euros dans la prévention des incendies et dans leur suppression. Encore les coûts des incendies de forêt sont-ils généralement sous-estimés, les dégâts directs étant seuls pris en compte, et souvent partiellement. Les pertes économiques réelles devraient intégrer la réponse (lutte), l'anticipation (prévention), les conséquences des feux ; les évaluations devraient porter sur de longues périodes après incendie, et appréhender l'ensemble des biens et services affectés par le feu.

2.2 Tempêtes

Les tempêtes de 1999 ont occasionné, en France et dans le domaine forestier, de l'ordre de 9 milliards d'euros de pertes, principalement pour les propriétaires forestiers, les assureurs (même si très peu de forêts étaient assurées), la société dans son ensemble (impacts environnementaux) et l'État qui, outre sa qualité de propriétaire des forêts domaniales, vient compenser dans ce cas un recours insuffisant aux assurances et l'absence de mécanisme forestier du type « Calamités agricoles » ou « Catastrophes naturelles ». Ce montant comprend d'abord une perte de valeur marchande des bois abattus (4,5 milliards d'euros) dont beaucoup sont endommagés, dont certains sont dispersés sur le terrain, dont tous arrivent sur un marché saturé pour lequel l'alternative est coûteuse et consiste soit en un stockage de quelques mois à quelques années, soit en un

transport vers des zones épargnées par les vents. Il en ressort ensuite une perte de valeur d'avenir (1,2 milliard d'euros) liée à l'abattage prématuré d'arbres ayant encore peu de valeur mais qui en auraient eu une beaucoup plus grande quelques années ou décennies plus tard. À ces deux pertes, il faut encore ajouter des frais supplémentaires de reconstitution et de gestion (0,9 milliard d'euros), le coût éventuel futur d'une fragilisation des peuplements restants (1,5 milliard d'euros), les atteintes à l'environnement (0,5 milliard d'euros) et même la perte subie par les peuplements épargnés où les coupes prévues ont dû être repoussées d'une à trois années (0,6 milliard d'euros).

2.3 Sécheresse et canicule

La sécheresse et la canicule de 2003 ont eu en France un effet moindre pour deux raisons : le volume des bois endommagés était bien inférieur et il s'est présenté de manière moins brutale. Son impact se caractérise par la mortalité des bois (perte de valeur marchande, d'avenir et frais supplémentaires de reconstitution ou gestion, se montant à plus de 0,5 milliard d'euros), par une réduction de la croissance des arbres restants (0,2 à 0,3 milliard d'euros), par des incendies quatre fois plus importants que d'habitude (0,2 milliard d'euros), la moindre production de truffes (14 millions d'euros) et la perte environnementale au niveau du carbone (0,4 milliard d'euros provenant à la fois d'une moindre séquestration et de l'abandon en forêt d'une partie des arbres morts), soit au total de l'ordre de 1,4 milliard d'euros.

3 Gestion des écosystèmes forestiers face aux événements extrêmes

Les modes de gestion des forêts dépendent largement des objectifs assignés (production ligneuse, protection, récréation, ressources en eau, biodiversité, etc.) et du propriétaire forestier (État, collectivité, particulier). Ils dépendent aussi de la nature des peuplements forestiers – existants, à créer ou à recréer. Bien entendu, les options de gestion doivent s'appuyer sur la connaissance des aléas (temps de retour, intensité), et des mécanismes impliqués (mise à feu et propagation du feu, interactions vent/arbre et peuplement) dans la genèse des dommages.

3.1 Tempêtes

Préventivement, on améliore la résistance et la résilience en optimisant l'adéquation essence × station, par intégration des caractéristiques d'enracinement. Lorsque les conditions naturelles le permettent et si c'est compatible avec les objectifs de production, le choix d'espèces feuillues est préférable à celui de conifères, ces derniers étant plus sensibles aux vents hivernaux (feuillage). La résilience des peuplements est généralement améliorée par les structures irrégulières et mélangées (mélange d'espèces par pieds d'arbres ou par bouquets), comparativement aux peuplements réguliers monospécifiques. La conduite des peuplements peut aussi permettre :

– d'augmenter la résistance des arbres et des peuplements par un itinéraire sylvicole qui influence la taille du houppier, le rapport hauteur/diamètre (conifères), et les amène plus tôt à un âge d'exploitabilité commerciale ;

– de diminuer la durée d'exposition à l'aléa tempête par un raccourcissement des révolutions (diminution de l'âge d'exploitabilité).

Les calculs économiques montrent qu'on a d'autant plus intérêt à programmer une telle diminution que la probabilité de l'aléa est grande et que celle de récupérer du bois est faible. Cependant, ils mettent aussi en évidence le fait qu'un excès en la matière altère très rapidement le revenu et que la réduction de l'âge d'exploitabilité en raison des risques doit rester mesurée.

Après tempête, il importe d'éviter toute précipitation génératrice de décisions pouvant avoir des conséquences négatives à long terme, telles que la vidange exhaustive des chablis avec des machines lourdes qui tassent les sols. L'exploitation des chablis doit être organisée selon un cloisonnement des parcelles, les processus naturels de reconstitution (successions végétales) privilégiés, de même que la régénération de peuplements mélangés plus résilients. De plus, dans des peuplements partiellement sinistrés, même à un degré élevé, il est recommandé à la fois aux plans écologique et économique de surtout conserver les arbres épargnés car ils maintiennent une ambiance forestière favorable à l'évolution tant du milieu que du peuplement futur, ils peuvent encore avoir un avenir économique et leur exploitation n'est pas opportune dans une situation de marchés saturés.

3.2 Incendies de forêt

Préventivement, il s'agit de jouer sur les causes structurelles des incendies par l'aménagement du territoire, le développement rural, l'urbanisme, la protection

civile. Les causes des incendies, notamment des grands feux, sont en effet liées à :

– une accumulation et une continuité (horizontale et verticale) de la biomasse dues à l'exode rural ;
– une interface à risque zones boisées/habitat en augmentation (il en est ainsi dans le Var pour plus de 50 % des maisons construites depuis 10 ans et, en cas d'incendie, les objectifs de protection civile des personnes et des biens l'emportent logiquement sur ceux de protection de la forêt) ;
– une politique systématique de suppression/exclusion du feu, dont le succès peut en revers conduire à de grands feux par accumulation de combustible.

En fait, l'échelle à considérer va de la parcelle et du massif forestier au paysage, avec une structuration spatiale explicite (en particulier : réseaux de coupure de combustibles). La gestion de la végétation devrait d'abord se soucier de la continuité du combustible (biomasse) et de l'inflammabilité et combustibilité des espèces forestières. Les aménagements devraient aussi identifier les forêts et massifs forestiers les plus vulnérables aux feux, notamment ceux à enjeux particuliers (biodiversité) ou dont la résilience potentielle est faible.

Après incendie, les mesures et travaux d'urgence pour réduire le ruissellement et l'érosion des sols ne sont à considérer que dans les zones exposées à ces risques. Une forêt incendiée ne nécessite pas forcément des travaux de reconstitution ou même une exploitation des arbres brûlés, et la plantation n'est pas nécessairement la meilleure réponse pour reconstituer la forêt brûlée. Il convient en priorité de s'appuyer sur la résilience naturelle des écosystèmes, pour peu que les incendies ne soient pas trop fréquents ni trop intenses. Si la plantation est nécessaire, alors la plus grande rigueur s'impose dans le choix des espèces et des techniques. Les grands feux peuvent aussi constituer une opportunité pour un aménagement et une gestion efficaces de paysages forestiers plus résistants et résilients.

D'une manière générale, les étés plus chauds, plus secs et plus longs attendus sous nos latitudes conduisent à centrer la gestion sur l'économie de l'eau.

Conclusion

La gestion forestière doit considérer tous les risques forestiers relatifs aux biens et services de la figure 3.1-1. Beaucoup sont sensibles aux événements

climatiques extrêmes mais aussi à des changements plus continus de climat, d'utilisation des terres, d'usage des biens et services en lien avec le contexte économique. Les gestionnaires peuvent appréhender l'ensemble de ces risques comme le montrent les stratégies développées par l'ONF, gestionnaire des forêts publiques et par la Caisse des Dépôts, plus grand propriétaire forestier privé. Ces stratégies ont pu être élaborées parce qu'elles portent sur de vastes surfaces. Il en va autrement des petits propriétaires.

Contribution aux recommandations. Réduire la vulnérabilité des forêts aux événements climatiques extrêmes nécessite de prendre en compte les différents risques et les diverses fonctions des forêts – la production de bois aussi bien que la conservation de la biodiversité. Les événements extrêmes ne paraissent pas devoir être totalement exclus puisqu'ils sont indispensables au maintien de certains processus et de certaines espèces. Les mesures adaptées consistent souvent à pratiquer des éclaircies individuellement mesurées, globalement fortes et de préférence précoces : elles permettent à la fois d'espérer une diversité floristique et faunistique conséquente, une plus grande résistance au vent, une demande en eau moins élevée, un meilleur état sanitaire et une croissance plus rapide. Cela n'implique pas forcément que tous les peuplements doivent être gérés à plus courte échéance ; mais cela signifie que la possibilité en est offerte pour une partie d'entre eux. De même, la supériorité d'un mode de traitement sylvicole par rapport aux autres n'étant pas démontrée, il est probablement plus sage de respecter la multiplicité des sylvicultures, elle aussi garante d'un meilleur équilibre global. Les réflexions sur ces sujets mériteraient d'être poursuivies avec une intégration plus aboutie entre sciences de la nature et sciences de la société.

Références bibliographiques

Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (2009). *Les forêts face aux tempêtes*. Éditions Quae, 470 p.

Birot Y., Gollier H. (2001). Risk Assessment, Management and Sharing in Forestry, with Special Emphasis on Windstorms, *Proceedings 14th Convocation International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences*. Espoo-Finland.

Ciais P. *et al.* (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**: 529-533.

Drouineau S. *et al.* (2000). *Joint Evaluation of Storms, Forest Vulnerability and their Restoration*. EFI Discussion Paper, **9**, 39 p.

Duncan P. *et al.* (2009). Impact des tempêtes de 1999 sur les relations forêt-chevreuils et implications pour la gestion de ces ongulés. *In* : Birot *et al.* (2009), *Les forêts face aux tempêtes*, Éditions Quae.

FAO (2007). *State of the World's Forests 2007*. FAO, Rome, 144 p.

Gauberville C. (2005). Successions forestières spontanées après tempête : les cas de l'Auvergne (1982) et de la Bretagne (1987). *In* : Birot *et al.* (2009), *Les forêts face aux tempêtes*, Éditions Quae.

IPCC (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Goup I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernemenental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. http://www.ipcc.ch

Nabuurs GJ. *et al.* (2003). Temporal evolution of the European carbon forest sink from 1950 to 1999. *Global Change Biology*, **9**: 152-160.

Schelhaas MJ. (2008). *Impact of natural disturbances on the development of European forest resources ; application of model approach from tree to stand levels to large scale scenarios.* Alterra scientific contributions 23-Alterra Wageningen UR- 168 p.

Thiollay JM., Legouar P. (2005). Impact de la tempête Lothar (1999) sur la communauté d'oiseaux d'une futaie de chênes de Champagne humide. *In* : Birot *et al.* (2009), *Les forêts face aux tempêtes,* Éditions Quae.

UN-ECE (2005). *European Forest Sector Outlook study.* Main report/ ECE/TIM/SP/20. United Nations, Geneva.

SOUS-CHAPITRE 3.2

Changement climatique et adaptation de l'agriculture

BERNARD SEGUIN

L'agriculture a toujours subi l'emprise des facteurs climatiques dont les valeurs moyennes ou normales conditionnent les potentialités de production dans une région donnée. Les progrès technologiques ont permis de faire progresser les rendements de manière spectaculaire dans la deuxième partie du XXe siècle, au moins dans les pays développés. Pour ceux-ci, le climat n'imposait plus que des fluctuations interannuelles de faible ampleur par rapport à la tendance déterminée par le progrès génétique, l'accroissement des intrants ou les traitements phytosanitaires. Bien documentés par les historiens, les épisodes de famines dramatiques consécutives à des conditions défavorables (temps froids et pluvieux persistants, ou canicule et sécheresse conduisant à l'échaudage des céréales) relevaient du passé. De même pour les conséquences économiques (encadré 3.2-1). Certes, des événements extrêmes comme le gel ou la grêle pouvaient causer des dégâts considérables, mais ils étaient généralement localisés. Seule la sécheresse paraissait en mesure d'agir notablement sur de vastes surfaces : l'épisode de 1976 avait remis ce risque en mémoire, mais il paraissait suffisamment exceptionnel pour ne plus se reproduire.

Or, des épisodes de sécheresse, certes moins importants, sont intervenus quelques années plus tard. Surtout, la canicule de l'été 2003 avec ses

caractéristiques exceptionnelles a replacé nos interrogations dans le cadre général du changement climatique. Les événements extrêmes vont se surimposer à une évolution de fond qui va concerner en premier lieu le fonctionnement des couverts végétaux. Cette évolution va résulter des effets conjugués de l'accroissement de la teneur en gaz carbonique et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, de l'élévation de la température et des modifications des bilans hydriques.

1 | Le cadre géographique

Les effets du changement climatique sur le rendement pourront donc être tantôt positifs, tantôt négatifs en région tempérée, mais ils seront quasi-systématiquement négatifs dans les zones tropicales (GIEC, 2007).

Dans ce contexte, l'agriculture européenne s'inscrit dans un cadre de région tempérée, avec une différenciation majeure entre le nord et le sud. En France, les simulations effectuées pour le blé et le maïs (Delecolle *et al.,* 1999, Seguin *et al.,* 2004) font ainsi apparaître un effet légèrement positif dans le nord, de l'ordre de 10 %, et des chutes possibles de rendement dans le sud, sous l'effet combiné de températures excessives et de la sécheresse. Pour les prairies du Massif central, une production fourragère augmentée de 20 % permettrait d'augmenter d'autant le chargement animal, sous réserve que la pluviométrie ne diminue pas trop (Soussana, 2001). *A priori*, les grandes cultures et les prairies devraient être plutôt favorisées, sauf dans le sud, menacé de sécheresses accentuées et de températures élevées. L'avancement de la phénologie peut aussi exposer les arbres fruitiers et la vigne aux dégâts du gel lors de la floraison (Domergue *et al.,* 2004). Ces résultats préliminaires sont actuellement en cours de révision dans des projets utilisant les avancées récentes, tant du point de vue du climat que de l'agronomie (ainsi, le projet CLIMATOR financé par l'ANR).

L'observation des insectes ne révèle que peu de signes indiscutables dans le strict domaine de l'agriculture (l'extension vers le Nord et en altitude de la chenille processionnaire concerne le pin et donc la forêt). À noter toutefois une évolution du cycle du carpocapse des pommes, avec apparition d'une troisième génération et une augmentation de la diversité des populations de pucerons, accompagnée d'une précocité accrue des périodes d'activité. À noter inversement une disparition du phomopsis du tournesol dans le sud-ouest, fortement défavorisé par les températures supérieures à 32 °C et très affecté par la canicule de 2003, mais qui réapparait timidement à cause des étés moins chauds de 2007 et 2008.

Les moyens modernes de transport peuvent aussi véhiculer rapidement certaines maladies ou certains ravageurs, et leur permettre de s'installer dans des régions où les conditions climatiques leur permettront un nouvel essor. D'où les interrogations actuelles sur des maladies émergentes dans le monde animal – fièvre du Nil sur les chevaux en Camargue, fièvre catarrhale – (encadré 4.1), mais aussi végétal : c'est le cas d'une mouche blanche (*Bemisia tabaci*) originaire des régions subtropicales, qui a été repérée depuis une dizaine d'années en Europe et a menacé les cultures sous serre du Sud avant des mesures énergiques de quarantaine.

2 | Événements climatiques extrêmes

Les événements climatiques extrêmes modifieront notablement les impacts d'un réchauffement moyen continu. C'est évident pour les sécheresses (comme en 2003, puis 2005 et 2006), et à un degré moindre pour les fortes pluies, qui affectent l'agriculture par l'érosion et l'inondation des parcelles. Il faut aussi compter avec la température : même dans le cas d'hivers plus doux, l'éventualité de gels d'hiver ou de printemps n'est pas à écarter, pas plus que d'épisodes de froid, comme en 1956 et 1987, dévastateurs pour les oliviers, les agrumes ou le mimosa. Quant aux canicules, leur fréquence devrait atteindre une année sur deux vers 2050, avec des températures dépassant 35 °C (Planton 2005 ; encadré 3.2-2), et la tolérance des écosystèmes actuels, cultivés et naturels, est mal connue.

La vigne a montré en 2003 sa capacité d'adaptation à des conditions exceptionnelles de sécheresse et de chaleur. Il paraît possible de conserver la typicité traditionnelle pour un réchauffement modéré (2 °C) en jouant sur les pratiques culturales ; au-delà, il faudra jouer sur l'altitude et la topographie, mais le maintien de la typicité des terroirs traditionnels deviendrait problématique, et difficilement envisageable au-delà de 5 °C. L'évolution vers des cépages plus méridionaux est aussi envisageable à terme, mais plutôt pour les terroirs de climat froid.

Plusieurs voies peuvent permettre une production agricole en conditions de sécheresse (Amigues *et al.*, 2006). Une stratégie prometteuse est de maintenir la croissance pendant les périodes de sécheresse en privilégiant les organes essentiels pour la production. Une telle « reprogrammation » de la plante met en jeu les signalétiques de stress, les mécanismes de croissance et l'ensemble du métabolisme de la plante. Elle sollicite conjointement les domaines de compétence de la génétique, de la génomique et de la modélisation (encadré 3.2-3).

Une deuxième voie possible est de mettre en place des systèmes de culture et d'élevage plus économes en eau. Les systèmes intrinsèquement les moins vulnérables sont ceux à base de cultures d'hiver. Les systèmes de cultures d'été, peuvent être adaptés par le biais de variétés précoces ou à cycle court. Cependant, les pistes les plus intéressantes sont celles offertes par des espèces couplant l'évitement (meilleur enracinement et/ou surface foliaire moins développée) et des caractères de tolérance. Deux espèces – le tournesol et le sorgho – ont déjà permis aux agriculteurs de s'adapter quand l'annonce de la sécheresse a pu être suffisamment précoce.

D'une manière générale, une diversification des systèmes de culture peut protéger la production de l'agriculteur et améliorer la gestion de la ressource en eau. Mais la rentabilité des systèmes alternatifs est ici essentielle ; elle passe par des recherches de débouchés et des structurations de filières, faute de quoi la diversification n'est que conjoncturelle et disparaît une fois la situation redevenue « normale ».

L'action publique peut augmenter la ressource, en ajustant l'offre à la demande, par exemple par construction de retenues collinaires. Il est alors nécessaire de connaître l'intérêt de chaque retenue pour la production, l'effet d'une augmentation de la demande consécutive à celle de l'offre, les éventuels problèmes écologiques associés, voire la sécurité pour les populations situées en aval. Des actions compensatoires *a posteriori* sont aussi possibles *via* l'assurance publique ou privée. Cependant, la récurrence du phénomène et son étendue spatiale imposent un coût d'indemnités élevé.

L'action publique peut encore permettre d'économiser l'eau en ajustant la demande à l'offre. L'État peut ainsi ne pas favoriser la pratique de l'irrigation, procéder par arrêtés préfectoraux ou par tarification. Il paraît important de passer d'une action *a posteriori* à une action *a priori,* et d'une action conjoncturelle d'ajustement (interdiction d'arroser, dérogation pour pâturer des jachères...) à une action structurelle de gestion volumétrique négociée sur des bases politiques et physiques.

Conclusion – Agriculture et réchauffement, un tableau contrasté

L'impact purement biotechnique n'est, au final, qu'une composante d'un ensemble en mutation, en interaction avec les autres composantes du changement global et les déterminants socio-économiques.

L'idée se dégage d'un effet variable selon les régions et les productions. Certaines zones des latitudes moyennes et élevées gagneront à un réchauffement modéré (1 à 3 °C), mais celles des faibles latitudes y perdront vraisemblablement. L'adaptation pourra permettre de valoriser les aspects positifs dans le premier cas (gains de rendement pouvant aller jusqu'à 10 ou même 20 %) et de limiter les pertes dans le second, la disponibilité en eau restant un enjeu majeur dans les zones à climat sec. Au-delà, pour un réchauffement supérieur à 3 °C, les rendements des différentes productions pourront chuter sérieusement, bouleversant l'agriculture au nord et provoquant des situations dramatiques au sud.

Les événements extrêmes vont intervenir pour tirer ce tableau moyen vers un bilan qui peut devenir plus négatif : certes, l'effet du gel, même s'il n'est pas forcément atténué, n'apparait pas comme un fléau dominant. En revanche, les sécheresses vont voir leur impact potentiellement accentué, et il faudra aussi considérer l'impact, qui lui est souvent associé, de températures excessives encore mal connues dans le climat actuel.

Contribution aux recommandations. Il est encore difficile de cerner les possibilités d'action vis-à-vis des effets des événements climatiques extrêmes. Ces effets dépendent des évolutions imposées par le changement climatique en valeur moyenne aux potentialités agroclimatiques des cultures. Si les moyens de parer aux dégâts du gel sont déjà bien connus, ceux de faire face à des températures élevées nécessitent des recherches spécifiques. L'élément le plus déterminant parait être la sécheresse, avec la question des ressources en eau. L'agriculture va devoir, dans tous les cas, s'adapter en réduisant sa demande. Des bases de connaissance existent, telles que l'expertise Inra de 2006. Le passage à l'action, comme toujours, n'est pas encore à la hauteur de l'enjeu.

Encadré 3.2-1

Événements climatiques extrêmes et les bouleversements agricoles : l'exemple de la Réunion

(Jean Dercourt)

La culture du café commencée au milieu du XVIIIe siècle, par importation de plantes yéménites, fut victime d'événements climatiques extrêmes sous le 1er Empire.

Les cyclones de février et mars 1806, les avalasses de décembre 1806 et janvier 1807, la sécheresse qui suivit et le cyclone du 14 mars 1807 anéantirent les plantations. Non seulement les caféiers avaient été déracinés et les bois noirs qui les protégeaient périrent de maladie, mais encore les nouveaux

plants ne trouvèrent plus dans un sol lavé jusqu'au tuf une nourriture suffisante et se desséchèrent.

Il a fallu repenser toute l'économie de l'île (André Scherer, Histoire de la Réunion).

Scherer A. (1965). Histoire de la Réunion, PUF.

Gérard G. (1984). Histoire résumée de la Réunion.

Encadré 3.2-2

Extension probable de la sécheresse

(Serge Planton, Météo-France, Toulouse)

Les scénarios de changement climatique indiquent que le réchauffement planétaire s'accompagnera probablement d'une extension des zones affectées par la sécheresse au cours du XXIe siècle.

Les mécanismes à l'origine de ces changements sont relativement bien connus. Les projections montrent une tendance à la diminution des précipitations en certaines régions subtropicales et, en été, dans les moyennes latitudes. Sur de vastes régions des moyennes et hautes latitudes, l'augmentation d'évapotranspiration due au réchauffement conduit à une réduction du bilan hydrologique en saison estivale. Le risque de sécheresse peut aussi être aggravé par la modification du régime des pluies, les précipitations ayant tendance à se répartir sur des épisodes moins nombreux mais plus intenses. De même, la fonte plus précoce de la neige au printemps, peut, dans certaines régions, conduire à un assèchement prématuré des sols.

Le risque de sécheresse estivale devrait ainsi plus particulièrement s'accroître en Europe centrale et sur le pourtour méditerranéen. Il devrait être également plus important en toutes saisons dans certaines régions subtropicales comme l'Amérique centrale, au-dessus des Caraïbes et au sud de l'Australie. L'évolution du risque de sécheresse reste cependant très incertaine dans d'autres régions comme l'Afrique de l'Ouest, même si l'on peut espérer réduire ou mieux évaluer les incertitudes dans les années qui viennent grâce à des programmes internationaux comme AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*, un programme international de mesure sur le terrain suscité par la France) et CORDEX (A *COordinated Regional climate Downscaling EXperiment*, un programme international d'intercomparaison de modèles climatique régionaux, en particulier sur l'Afrique). Même pour des régions où l'augmentation du risque est simulée par la plupart des modèles,

son amplitude reste difficile à évaluer en termes quantitatifs en raison des incertitudes des projections. Cependant, il est possible de fixer quelques ordres de grandeur : selon une étude récente conduite avec le modèle climatique du Hadley Center, l'extension des zones de sécheresse les plus extrêmes, qui occupent 1 % de la superficie des terres actuellement, pourrait représenter 30 % de cette superficie à la fin de ce siècle pour un scénario relativement pessimiste d'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre anthropique (scénario dit A2).

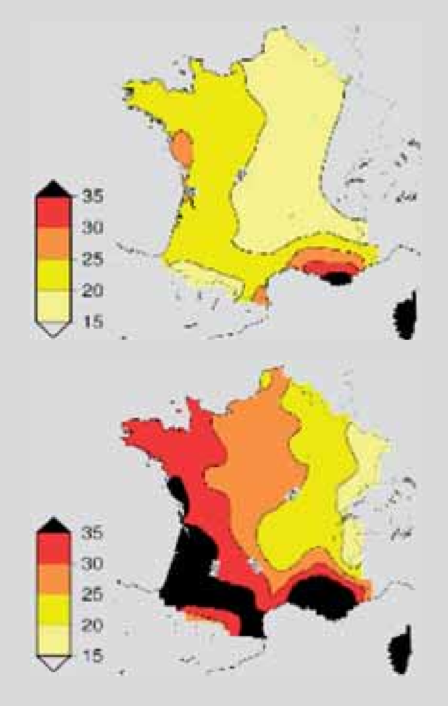


Figure 3.2-1
Moyenne du nombre maximal de jours secs (précipitations inférieures à 1mm) consécutifs pour la période 1960-1989 (a) et simulées pour la période 2070-2099 par le modèle climatique régional de Météo-France (b) suivant le scénario A2.

En France, l'impact du changement climatique à été étudié au moyen de projections réalisées à partir de modèles climatiques de Météo-France et de l'Institut Pierre Simon Laplace (Laboratoire de Météorologie Dynamique) adaptés à l'étude des climats régionaux. Pour le même scénario d'émission anthropique A2, il ressort de l'étude que les périodes de sécheresse estivales les plus longues (avec des précipitations inférieures au millimètre par jour) devraient passer d'environ 20 jours en moyenne sur la France sur la période 1960-1989 à environ 29 jours sur la période 2070-2099. L'augmentation serait en revanche plus modérée, bien que très significative, pour

un scénario plus modéré d'émissions (le scénario dit B2), avec un passage de cette durée à environ 24 jours.

Bien qu'identifiant une importante augmentation du risque de sécheresse dans notre pays du fait de l'impact du changement climatique sur les précipitations, cette étude reste cependant partielle car elle n'identifie pas les autres sources d'évolution de ce risque que sont l'évolution de l'évapotranspiration, de l'enneigement ou encore de l'occupation des sols.

Contribution aux recommandations : c'est pendant les périodes de sécheresse que se pose de manière la plus aiguë la question de la gestion des conflits d'usage de l'eau entre les différents secteurs socio-économiques. Cette question ne peut être seulement résolue par la gestion de la ressource notamment au travers du stockage au sein de retenues. Elle implique de se poser celle de l'adaptation aux changements à venir en cherchant aussi à limiter la demande. Il est important de mettre en place d'urgence les outils d'évaluation des impacts et des coûts associés à ces adaptations, en attendant une évaluation plus précise des risques.

Encadré 3.2-3

Biotechnologies végétales et tolérance à la sécheresse (Georges Pelletier)

Le milieu est rarement favorable à l'agriculture puisque seulement 15 % des sols cultivés dans le monde n'exercent pas de contraintes physico-chimiques particulières sur les plantes (Boyer, 1982). Parmi ces contraintes, la faible disponibilité en eau est la plus fréquente puisqu'elle touche près de 50 % des surfaces. L'amélioration de la gestion de l'eau passe en particulier par une amélioration des pratiques agricoles. La création de variétés végétales plus économes ou capables de surmonter des épisodes de déficit hydrique participe à cette amélioration. La recherche de solutions est d'autant plus urgente que ces contraintes sont appelées à s'étendre sous l'effet des évolutions climatiques et de la pression démographique. Les biotechnologies végétales, s'appuyant sur les progrès de la biologie moléculaire, permettent d'aller au-delà de la sélection de mutations aléatoires qui constitue depuis l'origine de l'agriculture l'essence de la domestication, puis de l'amélioration des espèces cultivées.

De nombreux travaux de génie génétique ont été réalisés dans cette perspective depuis une quinzaine d'années (par exemple : Park *et al.*, 2005, Hu *et al.*, 2006, Umezawa *et al.,* 2006, Karim *et al.,* 2007, Rivero *et al.,* 2007, Karaba *et al.*, 2007, Nelson *et al.*,2007, Yu *et al.*, 2008,). Ces travaux

montrent que des modifications génétiques portant sur certains gènes améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante ou lui permettent de tolérer des déficits hydriques importants. Un très gros effort de recherche reste nécessaire pour déboucher dans la pratique, en particulier pour ce qui concerne la production alimentaire dans les pays tropicaux et subtropicaux (Delmer, 2005). L'avantage évident d'une telle approche est sa polyvalence : elle peut s'appliquer à différentes espèces et les caractères améliorés sont facilement transférables par sélection à différents cultivars.

Boyer JS. (1982). Plant productivity and environment. *Science,* **218**: 443-448.

Delmer DP. (2005). Agriculture in the developing world: connecting innovations in plant research to downstream applications. *PNAS,* **102**: 15739-14746.

Hu *et al*. (2006). Overexpressing a NAM, ATAF, and CUC (NAC) transcription factor enhances drought resistance and salt tolerance in rice. *PNAS*, **103**: 12987-12992.

Karaba A. *et al*. (2007). Improvement of water use efficiency in rice by expression of *HARDY*, an *Arabidopsis* drought and salt tolerance gene. *PNAS,* **104**: 15270-15275.

Karim S. *et al*. (2007). Improved drought tolerance without undesired side effects in transgenic plants producing trehalose. *Plant Mol Biol*, **64**: 371-386.

Nelson DE. *et al*. (2007). Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres. *PNAS,* **104**: 16450-16455.

Park SH. *et al*. (2005). Up-regulation of a H^+-pyrophosphatase (H^+-PPase) as a strategy to engineer drought-resistant crop plants. *PNAS,* **102**: 18830-18835.

Rivero RM. *et al*. (2007). Delayed leaf senescence induces extreme drought tolerance in a flowering plant. *PNAS,* **104**: 19631-19636.

Umezawa T. *et al*. (2006). Engineering drought tolerance in plants: discovering and tailoring genes to unlock the future. *Curr Opin Biotech*, **17**: 113-122.

Yu et al. (2008). Activated Expression of an Arabidopsis HD-START Protein Confers Drought Tolerance with Improved Root System and Reduced Stomatal Density[W];[OA]. *Plant Cell*, **20**: 1134-1151.

Références bibliographiques

Amigues JP. *et al.* (Eds.) (2006). *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau.* Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, Inra, 72 p.

Delecolle R. *et al.* (1999). Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française *C.R. Académie Agriculture de France*, **85**: 45-51.

Domergue M. *et al.* (2004). Réchauffement climatique : quels effets sur la floraison chez trois espèces fruitières ? *Arboriculture fruitière*, **578**: 27-33.

GIEC/IPCC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : impacts, adaptation et vulnérabilité.
www.effet-de-serre.gouv.fr/groupe_de_travail_ii_du_giec_2007

Planton S. (2005). *Changements climatiques futurs en France*, in Greenpeace : Impacts climatiques en France, **1.5**: 48-54.

Seguin B. *et al.* (2004). Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne. *Lettre pigb-pmrc France Changement global*, **16**: 50-54.

Soussana J.F. (2001). *Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles.* Pp. 195-222 *in* Demeter, Armand Colin, Paris.

SOUS-CHAPITRE 3.3

Systèmes urbains et événements climatiques extrêmes

SABINE BARLES

Quelques chiffres peuvent nous convaincre des enjeux urbains des événements climatiques extrêmes : la population urbaine s'élève aujourd'hui à 77 % en France, 72 % en Europe et 50 % à l'échelle mondiale (http ://www.insee.fr/fr/), taux qui ne va cesser de croître compte tenu notamment de la croissance urbaine observée en Asie et en Afrique. À l'échelle planétaire, les phénomènes climatiques seraient par ailleurs à l'origine de la plus grande partie des pertes humaines dues aux grandes catastrophes, qu'elles soient naturelles ou technologiques (44,4 % de la mortalité des 40 plus grandes catastrophes de 1970 à 2000 (Dubois-Maury, Chaline, 2004)).

1 | Gestion urbaine des événements climatiques extrêmes : une trajectoire fortement marquée par la technologie

Depuis la révolution industrielle, les relations entre les sociétés urbaines et la nature ont été pensées, organisées, gérées, traduites concrètement et matériellement, selon des processus que l'on peut associer à la notion de trajectoire (Dosi, 1982). Cette trajectoire est déterminée par des techniques et des technologies, mais aussi par des politiques, règlements, professions, marchés, institutions formant un ensemble qui a gagné en développement et en cohérence depuis la fin du XVIIIe siècle – surtout en pays développés.

Sur cette trajectoire, les interactions entre villes et environnement sont guidées par quatre principes généraux[1] : 1) la nature et ses ressources sont au service de la société ; 2) la nature doit être maîtrisée de façon à ce que l'environnement urbain soit indépendant de ses contraintes courantes ou exceptionnelles ; 3) la technologie constitue la principale interface entre sociétés et nature – elle se traduit notamment par la réticulation urbaine, c'est-à-dire par la multiplication de réseaux visant à approvisionner les villes comme à évacuer les matières indésirables et à rendre compatibles manifestations naturelles (notamment climatiques) et sociétés urbaines ; 4) les impacts des activités humaines dommageables à l'environnement constituent des externalités négatives. Ces principes ont été déclinés dans le cadre de la gestion des événements climatiques extrêmes, généralement analysés au prisme de la notion de risque conçu comme le produit de la rencontre d'un aléa et d'une vulnérabilité caractéristique du territoire le subissant et des enjeux qui y sont attachés. L'occurrence du risque se traduit par des dommages de toute nature pour les citadins, leur patrimoine (entendu dans ses dimensions culturelles, sociales et économiques) et leurs activités.

Depuis une quarantaine d'années, cette trajectoire et ce mode d'analyse linéaire sont remis en question. Les solutions techniques lourdes montrent en effet leurs limites, voire leurs effets pervers. Ainsi, l'imperméabilisation des sols urbains associée à l'évacuation souterraine des eaux pluviales amène-t-elle à une augmentation des débits de pointe, donc du risque d'inondation – plus de tuyaux signifie donc plus de tuyaux (Chatzis, 2000). Plus grave, on assiste à une anthropisation des aléas naturels. La plupart des grandes villes sont par exemple affectées d'un îlot de chaleur (Escourrou, 1991), dû à la concentration énergétique qui les caractérise et à leur sécheresse (donc au très faible flux de chaleur latente, qui augmente d'autant celui de chaleur sensible), elle-même imputable aux choix de gestion de l'environnement urbain typiques de la trajec-

[1] On en trouvera une illustration dans (Barles, 1999).

toire ci-dessus décrite. Il en va de même de l'aggravation de certains événements climatiques et de leurs effets en cascade, comme ce fut le cas avec le cyclone Katrina qui, amplifié par les modes d'occupation du sol du delta du Mississipi, guidé par les canaux quadrillant cette région, a provoqué les inondations qui ont ravagé la Nouvelle Orléans en 2005 (Mancebo, 2006). Par ailleurs, si on considère que les villes sont responsables, directement ou indirectement[2], de l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre, alors force est de constater que l'urbanisation contribue indirectement à la formation d'événements extrêmes liés au changement climatique.

Les aménagements d'origine anthropique (qui dans certains cas ont été conçus pour faire face aux aléas) contribuent donc à la vulnérabilité urbaine, qu'elle soit entendue comme la somme des dommages potentiels ou comme celle des facteurs qui conduisent aux dommages tout en grevant la capacité de réponse de la société à la catastrophe. Par ailleurs, nous savons désormais qu'il est impossible, même au prix d'investissements colossaux, de supprimer le risque. Nous savons aussi que le risque d'événements climatiques extrêmes s'accroît et que des risques de plus en plus rares sont pris en compte. Ces réalités devraient conduire à un infléchissement de la trajectoire urbaine évoquée ci-dessus, voire à terme à une bifurcation[3].

2 | La dimension sociale des événements climatiques extrêmes

Les aménagements urbains résultent de l'intervention de multiples acteurs et de la combinaison de multiples enjeux qui vont s'ajouter aux acteurs et enjeux directement visés par la gestion des risques, faisant intervenir différentes échelles de décision et d'action, ce qui augmente encore la complexité des situations de crise. Cette dimension sociale se manifeste aussi en creux : en donnant l'illusion que le risque est totalement maîtrisé, la trajectoire décrite conduit à l'oubli du risque, à son inacceptabilité, à la perte d'un savoir ordinaire préexistant, si bien que les citadins sont démunis devant la catastrophe. Elle transparaît encore si l'on remarque que certaines mesures structurelles autrefois imposées ne sont plus acceptées par ceux qui les subissent, surtout s'ils ne sont pas les victimes du risque contre lequel ces mesures sont prises : c'est par exemple le cas des barrages-réservoirs situés à l'amont des agglomérations, dont les conséquences locales sont de moins en moins tolérées.

---

[2]Indirectement parce que la production industrielle et agricole est tirée par les villes qui en sont les foyers de consommation.

[3]Voir par exemple les résultats des modélisations réalisées par Météo-France qui montrent l'impact de divers scenarios de développement urbain et de végétalisation sur la fréquence et l'intensité des canicules dans l'agglomération parisienne.

Mais il y a plus. La vulnérabilité urbaine aux événements climatiques extrêmes s'avère très variable d'une ville à l'autre, comme elle peut l'être au sein d'une même ville. La crise exacerbe en effet les inégalités environnementales masquées par temps calme ; sa gestion est rendue d'autant plus difficile lorsque les disparités sociales et spatiales se traduisent par une remise en cause des liens de sociabilité urbaine, comme ce fut le cas à La Nouvelle-Orléans (Mancebo, 2006). Plus généralement, les modes de vie urbains peuvent s'avérer défavorables à la gestion de la crise, comme nous l'enseigne la canicule de l'été 2003 (surmortalité estimée à 15 000 décès en France (voir chapitre 4.1) : les personnes les plus touchées sont bien sûr celles qui sont physiquement affaiblies, mais parmi elles celles dont la solitude et ou les conditions de vie accroissent la vulnérabilité ; ce qui s'ajoute à la perte du savoir ordinaire relatif à la protection contre les températures extrêmes induit par la dépendance technologique. En d'autres termes, la vulnérabilité urbaine face aux risques et aux événements climatiques extrêmes tient autant aux structures de gestion de ces risques qu'aux caractéristiques physiques, économiques, sociales et spatiales des villes, bref à leur plus ou moins grande durabilité. L'expérience acquise de catastrophes plus ou moins récentes invite donc (elle aussi) à une bifurcation dans la trajectoire qui lie les sociétés et la biosphère.

3 | Les temps des événements climatiques extrêmes

Il s'agit alors de prendre en compte les trois temps de l'événement climatique extrême et des risques qui y sont associés : avant, pendant, après – puisque le risque n'est pas évitable – en ne donnant plus le primat aux mesures structurelles issues de la technologie lourde, en aménageant la ville non contre la nature, mais avec la nature.

L'avant est associé à la notion de prévention. Si l'on admet que les aléas naturels contiennent une part anthropique qui résulte de la façon dont les interactions entre villes (et plus généralement territoires) et nature ont été organisées, alors il est nécessaire, ne serait-ce que pour atténuer ces aléas, de repenser ces interactions et la coévolution des systèmes naturels et sociaux. En outre, puisque l'aléa seul ne peut être maîtrisé, il faut aussi réduire la vulnérabilité urbaine, adapter et préparer la ville aux événements climatiques extrêmes (qu'elle doit accompagner, au lieu de leur résister), non seulement par des aménagements physiques, mais aussi par des dispositifs d'information, de préparation, de formation, de pré-organisation des acteurs et citadins. Le « pendant » porte sur la gestion de la crise : alerte, information en temps réel et pour tous, regroupement et ou évacuation, secours, maintien ou rétablissement des fonctions et services essentiels. Ce pendant repose certes sur un substrat technologique, mais il doit mobiliser les réseaux sociaux au sens large (ce qui nécessite leur préexistence).

L'« après » concerne la réparation (à tous les sens du terme) et la recherche du retour à la normale. Bref, il s'agit non plus de « faire comme si » les risques devaient être éradiqués, mais de se placer sur la trajectoire suivie par un système urbain soumis à une perturbation – l'événement climatique extrême – et d'essayer de l'infléchir au mieux.

Les enjeux sont considérables. En termes de connaissances, on ne saurait s'en tenir à celle de l'aléa. Comprendre les interactions réciproques entre sociétés et nature devient la question centrale posée par la gestion urbaine des événements climatiques extrêmes. Cette gestion passe par une approche sociale de l'événement, mais aussi des métiers et institutions directement ou indirectement impliqués. Surtout, elle conduit à ne plus limiter l'action amont à la prévention, mais à créer les conditions de la résilience urbaine.

Contribution aux recommandations. S'il est impossible d'éviter que les espaces urbains soient confrontés aux événements climatiques extrêmes, il est important de considérer la contribution de la ville à la formation et à l'intensité de ceux-ci (exemple : extrêmes de température) de façon à pouvoir faire de l'aménagement urbain non plus un facteur d'aggravation, mais un outil d'atténuation des événements climatiques extrêmes et de leurs effets. Dans une même perspective, il est nécessaire de considérer ces effets comme résultant de l'événement lui-même mais aussi de structures socio-économiques, politiques et techniques dont ils peuvent révéler les dysfonctionnements ou les limites, ce qui conduit à associer à la prévention la recherche des conditions de la résilience urbaine et à ne pas s'en tenir à une gestion purement technique des événements climatiques extrêmes. Ceci milite pour une approche radicalement interdisciplinaire des événements climatiques extrêmes et de leurs effets en contexte urbain, c'est-à-dire associant sciences de la vie et de la terre, sciences pour l'ingénieur et sciences de l'homme et de la société, pour une compréhension précise des situations de crise et leur inscription dans les temporalités plus longues de la gestion urbaine.

Références bibliographiques

Barles S. (1999). *La ville délétère : Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain, XVIII-XIXe siècles*. Seyssel, Champ Vallon.

Chatzis K. (2000). *La pluie, le métro et l'ingénieur. Contribution à l'histoire de l'assainissement et des transports urbains*. Paris, L'Harmattan.

Dauphiné A. (2001). *Risques et Catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris, Armand Colin.

Dosi G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research policy,* **11**: 147-162.

Dubois-Maury J., Chaline C. (2004). *Les risques urbains.* 2e éd. [1re éd. 2002]. Paris, Armand Colin.

Escourrou G. (1991). *Le climat et la ville.* Paris, Nathan.

Mancebo F. (2006). Du risque naturel à la catastrophe urbaine : Katrina. *Vertigo*, **17**: 1-10.

Massard-Guilbaud G., Platt HL., Schott D. (Eds.). (2002). *Cities and catastrophes.* Frankfurt, Europäischer Verlag der Wissenschaften.

Mitchell JK. (Ed.). (1999). *Crucibles of hazards: Mega cities and disasters in transition.* New York & Tokyo, United Nations University Press.

Pottier N. (2006). Le risque inondation, *in* : *Analyse et gestion des risques*, Rennes : UVED, en ligne, [réf. du 24 nov. 2008]. http://www.e-sige.ensmp.fr/uved/risques/2.1.2/html/2.html

Prasad N. *et al.* (2009). *Climate resilient cities: A Primer on reducing vulnerabilities to disasters.* Washington DC, World Bank Publications.

CHAPITRE 4

Événements climatiques extrêmes et santé

JEAN-PIERRE BESANCENOT

Anticiper les problèmes de santé et minimiser les pertes humaines sont les deux objectifs évoqués dans ce chapitre à propos des grandes vagues de chaleur et de froid, ainsi que des extrêmes pluviométriques et des cyclones tropicaux. L'encadré qui l'accompagne concerne des maladies transmissibles, contagieuses ou non.

Les variations climatiques trop amples, trop prolongées ou trop fréquemment répétées constituent autant de risques majeurs pour la santé et pour la vie des personnes les plus fragiles. À défaut de pouvoir contrôler ces risques complètement, il faut apprendre à vivre avec eux, par des adaptations comportementales et technologiques, mais aussi par une meilleure prise en charge sociale de la vulnérabilité aux événements extrêmes. L'organisation de systèmes performants d'alerte et de prévention est essentielle, de même que celle, toujours critique, des services d'urgence.

Les variations du climat retentissent aussi sur la dynamique de nombreuses maladies transmissibles humaines et animales, voire sur leur émergence en de nouvelles régions. Ces émergences dépendent toutefois de tout un ensemble de conditions, certaines très localisées, dont il convient de tenir compte dans les modèles de prévision et les systèmes d'alerte précoce.

Les contraintes climatiques déterminent de simples réactions physiologiques de stade infraclinique tant qu'elles sont d'amplitude modérée (Besancenot, 2001). Mais les variations de l'ambiance extérieure trop amples, trop prolongées ou trop fréquemment répétées risquent de déborder les défenses de l'organisme, et de provoquer des états pathologiques susceptibles de mettre le pronostic vital en jeu. Parmi ces phénomènes climatiques « hors normes », paroxysmiques, figurent les grandes vagues de chaleur et de froid, les fortes précipitations sources d'inondations, les cyclones tropicaux.

1 | Extrêmes thermiques et santé

Les paroxysmes les plus préjudiciables à la santé sont liés aux extrêmes thermiques, sous les climats dits « tempérés », méditerranéen inclus.

1.1 Les grandes vagues de chaleur

On sait, au moins depuis les milliers de morts de l'été 1743 à Pékin, que des températures se maintenant à un niveau anormalement élevé peuvent provoquer de terribles hécatombes (Besancenot, 2002). En France, la canicule de 2003 a

entraîné près de 15 000 décès surnuméraires du 1er au 20 août – un excédent de 55 % par rapport à la mortalité attendue (tableau 4.1). À Chicago, le chiffre a même approché 150 % du 10 au 20 juillet 1995[1]. Certains de ces décès sont seulement précipités de quelques jours, ce que confirme parfois l'existence d'une sous-mortalité compensatrice dans les semaines et/ou les mois suivants. Cependant, compte tenu de leur âge, de leur sexe et leur état de santé, moins de 27 % des victimes de la canicule étaient destinées à mourir avant la fin de l'année (Toulemon, Barbieri, 2008). Les autres auraient pu espérer vivre encore, en moyenne, 8 à 11 ans. En fait, le nombre total d'années de vie perdues approche 100 000.

La surmortalité, synchrone des dispositions thermiques (figure 4.1), touche principalement les personnes âgées, plutôt de sexe féminin (65 % de femmes parmi les victimes de 2003). Les sujets à plus haut risque sont ceux qui vivent seuls, malades ou grabataires, ceux qui prennent à dose excessive des médicaments entravant la régulation de la température interne, ainsi que ceux de faible niveau socio-économique occupant des logements mal isolés et mal ventilés (à Paris, 41 % des victimes de l'été 2003 habitaient une seule pièce, et dans 33 % des cas sous les toits). Cependant, la déshydratation ou la défaillance de la thermorégulation ne sont pas seules en cause : la part de l'hyperthermie et du coup de chaleur dans l'excès de décès d'une canicule reste souvent très faible (6 % en 1975) et n'a jamais dépassé 44 % (chiffre de 2003). La surmortalité est aussi largement alimentée par les accidents cardiovasculaires (23 % des décès en août 2003), ainsi que par les pathologies respiratoires, métaboliques et psychiatriques. Le seuil thermique au-dessus duquel le nombre des décès grimpe en flèche est plus élevé dans les climats chauds (27,5 °C en Belgique, 41 °C en Andalousie). Dans ce contexte, les températures minimales jouent souvent un rôle décisif, en permettant ou non un repos nocturne réparateur. Par ailleurs, les canicules ont un impact sanitaire plus marqué dans les grandes villes que dans les campagnes (+134 % en Île-de-France du 1er au 20 août 2003, contre moins de 10 % dans le rural profond), en raison d'une diminution de la vitesse du vent, de la constitution d'îlots de chaleur urbains (assimilés parfois à des îlots de mortalité, *death islands*) et du rôle adjuvant de la pollution atmosphérique.

Un bilan aussi lourd que celui de l'été 2003 en France ne peut s'expliquer que par une vague de chaleur exceptionnelle de par : son intensité (records absolus de température dans 39 % des stations de Météo-France), sa durée (les

[1] Avec 485 décès par hyperthermie et 739 décès en surnombre, la vague de chaleur de 1995 à Chicago est souvent décrite comme l'une des plus meurtrières de l'histoire des États-Unis, surtout dans la population masculine, chez les Noirs et au troisième âge. Les ghettos afro-américains, marqués par une très forte ségrégation économique et raciale, ont été les plus touchés, d'autant qu'ils ont connu de multiples coupures d'eau et d'électricité. Les Hispaniques, en revanche, ont peu souffert malgré leur statut souvent précaire, sans doute grâce à la solidité des réseaux sociaux, familiaux et associatifs, dans leurs quartiers (E. Klinenberg, 2003).

	Dates	Surmortalité	% de surmortalité
France entière	01-07 août 1975	2 952 décès	+ 31 %
France entière	28 juin-08 juillet 1976	5 116 décès	+ 33 %
France entière	10-15 juillet 1983	1 473 décès	+ 17 %
Marseille	*25 juillet-05 août 1983*	*300 morts*	*+ 110 %*
France entière	01-07 août 1990	1 624 décès	+ 18 %
France entière	30 juillet-03 août 2001	1 330 morts	+ 21 %
France entière	03-15 août 2003	13 734 décès	+ 78 %
France entière	*01-20 août 2003*	*14 947 décès*	*+ 55 %*
dont Île-de-France	*01-20 août 2003*	*4 867 décès*	*+ 134 %*
dont région Centre	*01-20 août 2003*	*1 238 décès*	*+ 103 %*
France entière	11-28 juillet 2006	2 062 décès	+ 9 %

Tableau 4.1
Mortalité associée aux vagues de chaleur en France, depuis 1970. Sources : Rey et al. (2007) ; Inserm-CépiDc-IFR69.

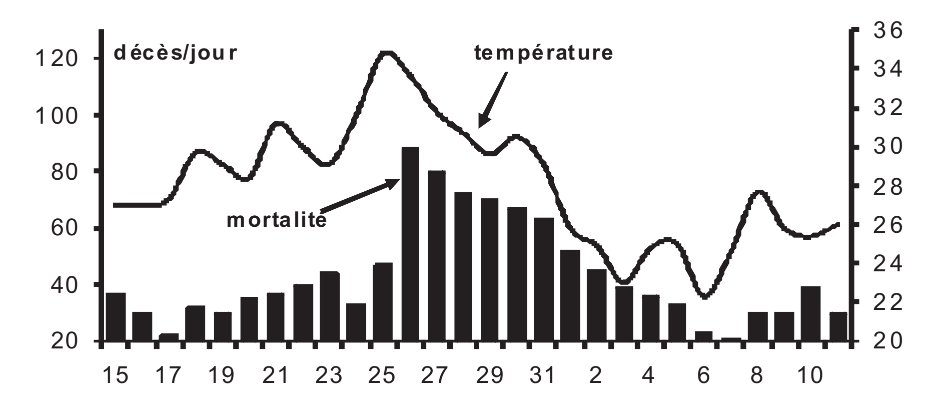


Figure 4.1
Mortalité (échelle de gauche) en relation avec les températures moyennes journalières (échelle de droite) du 15 juillet au 12 août 1983 à Marseille. Normales de la période : 27 décès/jour et 23,4 °C.

premières températures anormalement élevées remontent au 25 mai), sa date de paroxysme (en août, quand les personnes âgées sont plus isolées que jamais, famille et voisins étant en vacances), son extension spatiale (l'ensemble du territoire national touché de façon presque homogène), la vulnérabilité de la population concernée (accroissement du pourcentage des personnes très âgées). Mais l'exception de 2003 risque de devenir courante demain, à cause du vieillissement de la population, de sa concentration croissante dans de grandes agglomérations et d'un possible dérèglement climatique lié à l'effet de serre (Menne, Ebi, 2006). À défaut de pouvoir les contrôler complètement, il faut donc *apprendre à vivre* avec de tels risques (Besancenot, 2007), ce qui justifie des adaptations comportementales et technologiques (notamment dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme), mais aussi une meilleure prise en charge sociale et la mise en place de systèmes performants d'alerte et de prévention (Pascal *et al.*, 2006).

1.2 Les grandes vagues de froid

Deux phénomènes interviennent dans la plus totale indifférence sociale (Healy, 2003). Le premier est *structurel* (on meurt davantage en hiver qu'en été, aujourd'hui, dans tous les pays tempérés développés) et le second, *conjoncturel* (les vagues de froid amplifient considérablement la surmortalité hivernale).

Des cas d'hypothermie accidentelle sont régulièrement observés quand la température hivernale descend à un niveau inhabituellement bas (Tanaka, Tokudomé, 1991), nécessitant des stratégies de santé publique. Cependant, ces drames hypermédiatisés se limitent le plus souvent aux milieux socialement très

défavorisés et concernent rarement plus de quelques dizaines de sans-abri, ainsi qu'un petit nombre de sujets en état de démence. Le froid tue bien plus par accidents cardiocirculatoires et respiratoires : en janvier-février 1985, alors que la presse titrait sur « 57 morts », la France a enregistré 8 500 à 9 000 décès surnuméraires, soit un excédent moyen de 10 %, avec des pointes à 30 % en plusieurs arrondissements parisiens. À l'exception des accidents de la route (–30 %), toutes les causes de décès ont alors été surreprésentées : +19 % pour les affections cardiovasculaires, +20 % pour les maladies endocriniennes, +30 % pour les troubles mentaux et les maladies de l'appareil respiratoire (dont + 200 % pour les pneumonies). Les victimes étaient en majorité des personnes âgées, de l'un et l'autre sexe, à état général déjà très altéré, les villes étant plus touchées que les campagnes et les « beaux quartiers » parfois plus que les banlieues dites difficiles.

La prévention « sociale » doit être complétée par une prévention sanitaire, d'autant que la tendance générale au réchauffement n'exclut en rien la survenue épisodique de « coups de froid » vigoureux.

2 | Extrêmes pluviométriques et santé

Les dommages causés par les inondations sont souvent considérables : le bilan du mois d'août 2002 en Allemagne a dépassé les 11 milliards d'euros. Mais les répercussions sur la santé, redoutables à l'échelle planétaire avec plus de 25 000 morts par an (Ramade, 2006), restent relativement réduites dans les pays riches : en moyenne, sur la période 1980-1999, l'Europe occidentale n'a eu à déplorer que 1,3 décès et 5,7 blessés par an pour 10 millions d'habitants.

Trois types d'impacts sanitaires – traumatiques, infectieux et mentaux – interviennent successivement. Les effets traumatiques (blessures, ensevelissements, noyades...) sont concomitants de la montée des eaux. Exceptionnels lors d'inondations lentes, sauf lorsqu'elles entraînent des ruptures de digues et se combinent à des inondations marines (1795 morts aux Pays-Bas en février 1953), ils se manifestent surtout en présence d'inondations brutales, par exemple lors des crues-éclair des climats méditerranéens (147 morts à Sarno, en Campanie, en mai 1998), spécialement là où elles sont aggravées par l'urbanisation (9 morts à Nîmes en octobre 1988). La baisse du niveau des eaux ne ramène pas nécessairement la santé : le risque infectieux peut prendre le relais du risque traumatique, sous forme d'épidémies favorisées par la submersion des terres (leptospirose en République Tchèque en 1997) ou par la pollution microbienne des nappes souterraines et des périmètres de protection autour des sites de prélèvement ou de pompage (7 300 cas de diarrhées à transmission hydrique

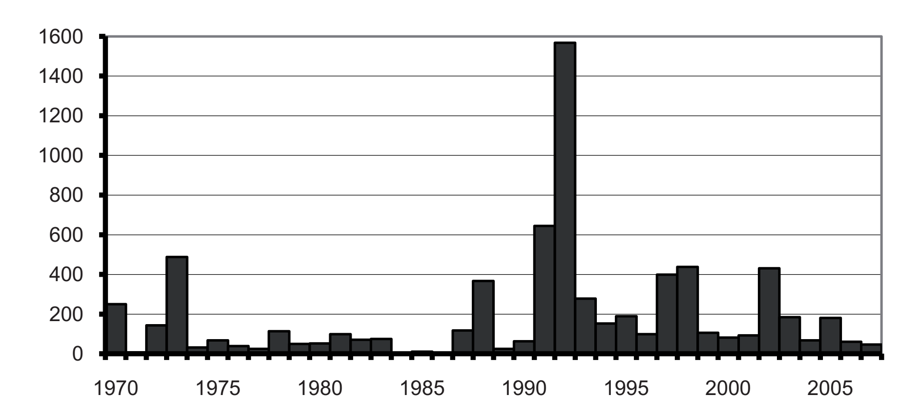


Figure 4.2
Nombre de victimes des inondations en Europe (1970-2007). Source : Emergency Events Database EM-DAT, Université Catholique de Louvain.

en Finlande en 1998-1999). Enfin, des troubles tels que dépression, anxiété et insomnie peuvent s'installer : aux Pays-Bas, six mois après des inondations, 20 % des enfants et 15 % des adultes présentent des symptômes de stress modérés à sévères. Lors des inondations de la Somme au printemps 2001, les personnes ayant été évacuées souffraient davantage de ces pathologies de stress que celles restées dans leur milieu de vie.

On peut craindre qu'environ 2,5 milliards d'humains ne soient exposés à des crues catastrophiques en 2050 par conjonction de la croissance démographique dans les territoires inondables, d'interventions humaines sur les bassins versants, des changements climatiques, de la déforestation et accessoirement d'une hausse du niveau des mers. Mais, si les plus vives inquiétudes sont de mise pour la santé des habitants des pays en développement, spécialement en Asie, il n'est pas sûr que l'impact sanitaire aille croissant dans les pays riches. Les cyclones tropicaux appellent un constat assez proche.

3 | Cyclones tropicaux et santé

Les effets des cyclones tropicaux sur la santé sont *a priori* bien connus (Besancenot, 1992 ; Pagney, 1994) : les vents violents, la montée des eaux marines et les pluies torrentielles provoquent des chutes d'arbres, des écroulements de maisons, des transports d'objets devenant de redoutables projectiles, des inondations, des coulées de boue, des glissements de terrain. La submersion des côtes serait ainsi responsable de 75 % des pertes humaines, les victimes se répartissant par moitié entre noyés et ensevelis. À lui seul, le typhon

de novembre 1970 au Pakistan oriental a anéanti 17 % de la population côtière (242 000 victimes). La submersion des sols, l'interruption de la distribution de l'eau potable, la destruction des canalisations et la désorganisation des services sanitaires se conjuguent souvent pour déclencher des épidémies (typhoïde, choléra, hépatite A, affections respiratoires ou gastro-intestinales, parfois paludisme et tuberculose). Cependant, le nombre de morts, de blessés et de malades dépend davantage du niveau de développement que de la force des vents et de l'intensité des pluies. Si les décès se concentraient autrefois en phase d'impact, la qualité accrue des prévisions et l'adoption de mesures efficaces de protection civile tend désormais à déporter le risque vital vers la phase suivante : deux ou trois semaines après le passage d'un cyclone, malades (victimes des mauvaises conditions d'hygiène) et blessés (atteints au cours des opérations de déblaiement ou de reconstruction) affluent encore dans les hôpitaux.

À cela s'ajoute la pathologie de stress. Avant même le lancement des consignes d'alerte, la phase précyclonique est déjà marquée par une recrudescence de troubles, le plus souvent sans gravité, mais parfois d'emblée redoutables (asthme, infarctus du myocarde...). Le cyclone occasionne ensuite une tension extrême, objectivée par de multiples manifestations neurovégétatives (tachycardie, tremblements, crises d'angine de poitrine...). L'écroulement de l'univers familier provoque de profonds traumatismes psychologiques, apparemment majorés lorsque le météore passe de nuit (cas d'Hugo en Guadeloupe, en septembre 1989). Les accès d'auto- et d'hétéro-agressivité sont alors fréquents. Dépressions, névroses et psychoses, avec abus d'alcool et phobie des éléments naturels, s'installent souvent durablement. Six à douze mois après un cyclone, la consommation d'hypnotiques et d'anxiolytiques peut être trois à quatre fois plus forte qu'à la veille du cataclysme, et ne revenir à son niveau antérieur qu'au bout de cinq ans.

Conclusion

Les grands paroxysmes climatiques constituent autant de risques majeurs pour la santé et pour la vie des sujets les plus fragiles. Les risques ne sont pas tant fonction des valeurs prises par tel ou tel élément du climat que de la vulnérabilité des personnes impliquées – vulnérabilité qui intègre à la fois histoire personnelle et de multiples composantes du milieu de vie, sous l'effet du contexte économique, social et culturel. Mais, les catégories de population les plus exposées étant connues, et les situations météorologiques à risque identifiées, il devrait être possible de développer un système de prévision adéquat, visant à une prévention efficace chaque fois que possible, en même temps qu'une gestion du risque, notamment à travers l'organisation des services d'urgence. Un « déficit de surmortalité » évalué à quelque 4 400 vies épargnées durant la canicule de

2006, par rapport à ce que l'on pouvait redouter compte tenu des températures observées, témoigne de l'efficacité de ces mesures, même si elles sont encore insuffisantes.

Contribution aux recommandations. Poursuivre les travaux engagés après l'été 2003 pour améliorer les performances du système de prévision médico-météorologique, transformant la prévision météorologique classique en une prévision de risque pour la santé, de façon à mobiliser suffisamment tôt les plans de réponse (plans canicules, grands froids, cyclones...) tout en réduisant la probabilité de fausses alertes, très démobilisatrices.

Encadré 4.1

Climat et maladies transmissibles

(Jean-Claude Manuguerra, Institut Pasteur)

Les effets possibles du changement climatique global à long terme sur les maladies épidémiques soulèvent des questions auxquelles il est très difficile de répondre. Les épidémies ont en effet des relations très complexes avec le climat et de nombreux facteurs influencent leur dynamique : évolution des pathogènes et de leur résistance aux antimicrobiens, dissémination rapide et globale des microbes, évolution et dissémination des vecteurs, programmes de santé publique. De plus, les conclusions des études individuelles ne permettent pas toujours de dégager des généralités.

Il est clair toutefois que les distributions géographique et temporelle de nombreuses maladies infectieuses sont liées au climat. Température, précipitation et hygrométrie influencent le cycle des pathogènes et surtout de leurs vecteurs, favorisant dans certaines circonstances la survenue d'épidémies. L'association entre variations climatiques et incidence de maladies infectieuses a maintes fois été relevée, et certaines études vont jusqu'à modéliser l'impact de changements climatiques sur les maladies essentiellement à vecteurs, comme le paludisme ou la dengue, mais aussi sur les maladies dont l'agent étiologique peut se trouver dans l'environnement, comme le choléra. Ces modèles liés à des observations à distance, par satellites par exemple, peuvent permettre de prévoir les conditions favorables aux épidémies, donc assister les systèmes d'alerte précoce et anticiper les actions de santé publiques à mettre en place avant la crise sanitaire.

Il faut cependant se garder d'interprétations hâtives basées sur une appréciation partielle des données existantes. Plusieurs facteurs sont également déterminants dans la dynamique des maladies infectieuses : le niveau d'hygiène, la mise en œuvre de programmes sanitaires, les systèmes de soins, les armes que sont les vaccins et les médicaments prophylactiques, mais aussi

les facteurs démographiques (densité des populations en particulier), culturels et socio-économiques.

Ainsi, le paludisme paraît gagner du terrain au nord et au sud des tropiques, peut-être par extension des aires de circulation des vecteurs suite au réchauffement climatique. Aux États-Unis, cette maladie généralement confinée à la Californie, apparaît depuis bientôt vingt ans sous la forme d'épidémies dans d'autres États comme la Floride, le Texas, voire plus au nord comme dans l'État de New York. Dans le vieux monde, le paludisme est également réapparu dans des zones où il était rare comme dans le sud de l'Europe et de la Russie.

Il ne faudrait pas conclure *ipso facto* à un retour possible du paludisme avec le réchauffement climatique, par exemple en France. De nombreuses régions d'Europe étaient autrefois impaludées notamment pendant la période du « petit âge glaciaire », caractérisée par des hivers très froids. Le paludisme a été éliminé d'Europe occidentale au début du XXe siècle, d'ailleurs sans que les vecteurs aient disparu, en raison non de modifications climatiques, mais des progrès accomplis dans les domaines socioéconomique et sanitaire. Actuellement, dans l'hypothèse d'une introduction de parasites dans les régions d'Europe où les anophèles sont présents, une modification climatique n'augmenterait pas le risque de réimplantation du paludisme, d'autant plus que les anophèles européens ne seraient pas forcément des vecteurs particulièrement compétents pour des souches de *Plasmodium sp.* des zones tropicales qui ne leur seraient pas adaptées (Rodhain F., 2007).

Les épidémies de fièvre de la vallée du Rift

L'émergence de nouveaux agents pathogènes tient à la fois aux variations du milieu physique et chimique et à la diversité des entités biologiques comme les virus, qu'à leur relation avec leur milieu. L'étude des épidémies de fièvre de la Vallée du Rift, maladie infectieuse non contagieuse mais transmissible par un vecteur arthropode hématophage est démonstrative à cet égard.

Des épidémies de fièvre de la vallée du Rift (FVR), une arbovirose, ont affecté l'Afrique orientale de 1950 à 1998. Ces épidémies étaient consécutives à des périodes de pluies inhabituelles, ce qui a conduit Linthicum *et al.* (1999) à analyser les données de température de surface des océans indiens et pacifique en les couplant aux différences normalisées de l'index de végétation mesurées par satellite. Ces auteurs ont ainsi montré que les épidémies de FVR pouvaient être prévues jusqu'à cinq mois avant que n'éclatent les foyers épidémiques en Afrique de l'Est. Le suivi par télédétection satellitaire utilisant la différence d'index de végétation normalisée permet d'identifier les zones affectées et à risque.

Plus globalement, il apparaît que les flambées de FVR en Afrique orientale sont étroitement associées aux fortes précipitations qui surviennent pendant les phases de réchauffement liées au phénomène El Niño (ENSO).

Des modèles de prévision et des systèmes d'alerte précoce pour la FVR ont ainsi été mis au point à l'aide des images satellite et des données sur les prévisions météorologiques et climatiques. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) commence à utiliser ce type de systèmes d'alerte précoce, permettant aux autorités d'instaurer les mesures nécessaires pour éviter des épidémies imminentes. Ceci prend encore plus de sens dans le contexte du nouveau règlement sanitaire international (2005)[2].

Conclusion

Les variations du climat retentissent sur la dynamique de nombre de maladies transmissibles (contagieuses ou non) humaines et animales, voire contribuent à leur émergence surtout territoriale par élargissement des aires de répartition des arthropodes hématophages dans le cas des arboviroses. Cependant, l'apparition ou l'extension des aires à risques d'épidémies de telle ou telle maladie transmissible dépend de tout un réseau de conditions dont certaines peuvent absorber les effets du climat. Il faut se garder des simples parallèles entre températures en hausse et retour en régions tempérées des maladies aujourd'hui considérées comme tropicales (Rhodain, 2007) : des conditions anthropiques et/ou entomologiques (vecteurs incompétents) peuvent intervenir avec des impacts qui peuvent être très variables en fonction de conditions parfois très locales.

Linthicum KJ. *et al.* (1999). Climate and Satellite Indicators to Forecast Rift Valley Fever Epidemics in Kenya. *Science*, **285**: 397-400.

Rodhain F. (2007), Impacts potentiels du changement climatique sur la santé : l'exemple des maladies à vecteurs, *in* rapport de l'ONERC. *Changements climatiques et risques sanitaires en France* : 65-71.

Références bibliographiques

Besancenot JP. (1992). Les cyclones tropicaux et leurs répercussions sur la santé. *Cah Santé*, **2**: 291-299.

Besancenot JP. (2001). *Climat et santé*. PUF, Paris, 128 p.

Besancenot JP. (2002). Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environ Risques Santé*, **1**: 229-240.

[2] http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs207/fr/

Besancenot JP. (2007). *Notre santé à l'épreuve du changement climatique*. Delachaux & Niestlé, Paris, 222 p.

Healy JD. (2003). Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *J Epidemiol Community Health*, **57**: 784-789.

Klinenberg E. (2003). *Heat wave: a social autopsy of disaster in Chicago*. University of Chicago Press, Chicago, 305 p.

Menne B., Ebi KL. (2006). *Climate change and adaptation strategies for human health*. Springer, Darmstadt, 449 p.

Pagney P. (1994). *Les catastrophes climatiques*. PUF, Paris, 128 p.

Pascal M. *et al.* (2006). France's heat health watch warning system. *Int J Biometeorol*, **50**: 144-153.

Ramade F. (2006). *Des catastrophes naturelles ?* Dunod, Paris, 258 p.

Rey G. *et al.* (2007). Vagues de chaleur, fluctuations ordinaires des températures et mortalité en France depuis 1971. *Popul*, **62**: 533-564.

Tanaka M., Tokudomé S. (1991). Accidental hypothermia and death from cold in urban areas. *Int J Biometeorol*, **34**: 242-246.

Toulemon L., Barbieri M. (2008). The mortality impact of the August 2003 heat wave in France: investigating the "harvesting" effect and other long-term consequences. *Popul Stud*, **62**: 39-53.

CHAPITRE 5

Économie

– **Couverture financière des événements climatiques extrêmes**

– **Impact macroéconomique des catastrophes naturelles : mécanismes d'amplification et frein au développement**

Une véritable transformation du système de couverture financière s'impose en cette période de catastrophes à grande échelle. Quel sera le prix à payer pour ceux qui résident dans des zones exposées ? Quelle redistribution des rôles de l'assurance de marché et des États ? Quelles innovations financières mettre en place pour rendre nos pays plus résilients aux futures catastrophes ?

Cette transformation est un pilier essentiel d'une indispensable nouvelle gouvernance, tant dans les pays de l'OCDE dans lesquels l'architecture d'assurance joue souvent un rôle important que dans les pays pauvres dans lesquels tout événement climatique extrême se transforme en tragédie humaine, interrompant par ailleurs toute croissance économique naissante.

Le changement climatique peut amplifier le coût des canicules, des sécheresses et des inondations en modifiant la distribution spatiale de leurs intensités en certaines régions : ce risque doit être mieux pris en compte dans les évaluations des coûts économiques du changement climatique.

À cet égard, modéliser l'impact macroéconomique des catastrophes naturelles implique une analyse des effets de court terme, des impacts indirects et des conséquences sociales des catastrophes. Il est primordial de prendre en compte les déséquilibres économiques préexistants, ainsi que la durée des périodes de reconstruction, elle-même liée aux capacités de production des économies touchées. La faiblesse des capacités de reconstruction enferme certains pays pauvres dans des trappes à pauvreté susceptibles de s'approfondir avec le changement climatique.

SOUS-CHAPITRE 5.1

Couverture financière des événements climatiques extrêmes

ERWANN MICHEL-KERJAN

Introduction[1]

Le traitement économique de la question des événements climatiques extrêmes est complexe et vaste, et il ne s'agit bien sûr pas dans ce chapitre et le suivant de traiter cette question dans son intégralité. Plus spécifiquement, nous avons décidé de focaliser l'analyse sur deux aspects qui nous paraissent critiques. Le premier, à une échelle microéconomique (individus et entreprises), est la question de la couverture financière des conséquences de catastrophes climatiques : qui paiera ? Le second aspect, à une échelle macroéconomique, est celui de leur impact sur le développement économique des pays (chapitre 5.2).

Lors de la survenance d'une grande catastrophe, l'attention doit d'abord se porter sur la gestion de crise et l'aide physique aux victimes. Après cette

[1] Je remercie Dominique Bureau, Stéphane Hallegatte, Claude Henry, Howard Kunreuther, Sabine Lemoyne de Forges, Thierry Masquelier, Pierre Michel, Roland Nussbaum, et Pierre Picard, ainsi qu'Henri Décamps et les membres du groupe de relecture de l'Académie des sciences pour nos échanges sur ces questions et leurs commentaires sur des versions antérieures de ce chapitre.

première phase (typiquement quelques heures ou jours), se pose très vite la question de l'indemnisation et de la reconstruction : qui paiera pour les coûts de la catastrophe ? Les victimes elles-mêmes, individus et entreprises ? Les compagnies d'assurance ? Les États ? Les donneurs internationaux, comme c'est souvent le cas lorsque ces catastrophes surviennent dans des pays pauvres dépourvus de tout système d'assurance ?

Ce chapitre se concentre sur le rôle des mécanismes d'assurance, publics et privés, dans les pays développés. Plus particulièrement, nous montrons, au travers du cas spécifique des États-Unis, comment le marché de l'assurance catastrophes y a connu ces dernières années une transformation significative en réponse à une série d'événements climatiques extrêmes.

L'assurance couvre individus et entreprises contre les conséquences économiques des grands risques, moyennant le paiement *ex ante* d'une prime individuelle relativement modeste au regard des potentialités de pertes. L'assurance est aujourd'hui, on le sait peu, l'un des plus larges secteurs économiques dans le monde en termes de chiffre d'affaires. Néanmoins, les systèmes d'assurance de marché traditionnels montrent leurs limites si les conditions d'assurabilité ne tiennent plus. C'est le cas, par exemple, si la diversification géographique des risques et la diversification temporelle est rendue difficile. Or, ce serait précisément le cas dans le scenario d'un changement abrupt du climat (Weitzman, 2007, 2009) selon lequel nous devrions nous attendre à l'occurrence de plus larges catastrophes qui toucheraient, au même moment, un très grand nombre de victimes, et surviendraient de manière beaucoup plus rapprochée dans le temps (car cela ne permettrait pas aux assureurs de collecter assez de primes entre deux événements).

En 2004 et 2005, sept ouragans de grande ampleur ont frappé les États-Unis en l'espace de quinze mois, occasionnant plus de 120 milliards de dollars de pertes assurées, soit plus de trois fois les pertes assurées des attentats terroristes du 11 septembre 2001, à l'époque le sinistre le plus coûteux de l'histoire de l'assurance mondiale. S'ensuivirent une crise de l'assurance catastrophe, puis une transformation de fond du système d'assurance américain, entraînant une redistribution radicale des rôles entre assureurs privés et états en faveur de ces derniers – une situation quelque peu surprenante au pays du « tout marché » (Kunreuther, Michel-Kerjan, 2009). Les catastrophes en série survenues récemment aux États-Unis démontrent de manière très nette les enjeux, et nous focaliserons une large part de l'analyse sur ce pays, avant de conclure sur les leçons pour notre pays. En effet, si l'Europe et la France n'ont pas connu de tels extrêmes, les récentes inondations, tempêtes et vagues de chaleur sont autant de signaux d'alarme pour les prochaines années, de notre côté de l'Atlantique.

1 | Une nouvelle ère de catastrophes

Dans le passé, les Français ont été relativement à l'abri de grands événements naturels dévastateurs. Néanmoins, notre pays a subi une alternance de sécheresses et d'inondations importantes au cours des vingt dernières années. Les tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999 et la canicule de 2003 sortaient des cadres envisagés par les modèles de prévision météorologiques traditionnels : elles ont accentué le sentiment de vulnérabilité et de changement fondamental possible.

À l'échelle internationale, la croissance récente du nombre de catastrophes d'origine naturelle est encore plus significative, avec un impact très net sur le coût pour les assureurs. La comparaison des 20 dernières années (1989-2008) et des 19 années précédentes (1970-1988) révèle un changement radical de coût des catastrophes (figure 5.1-1).

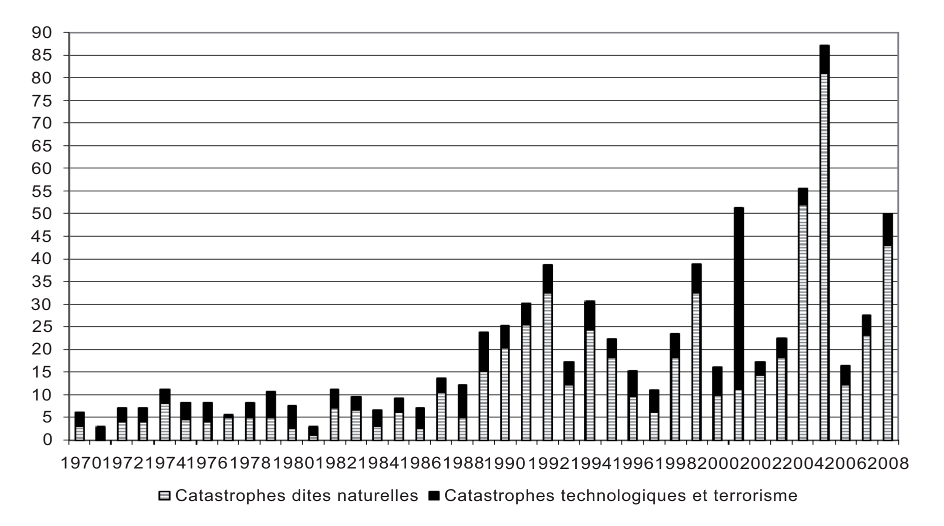


Figure 5.1-1
Évolution mondiale des dommages assurés dus aux catastrophes, 1970-2008 (axe des ordonnées en milliards de dollars, prix corrigés de l'inflation) - Kunreuther, Michel-Kerjan (2009).

De 1970 au milieu des années 1980, les pertes assurées dues à des catastrophes d'origine naturelle dans le monde atteignaient 3 ou 4 milliards de dollars par an. Les tempêtes de 1987 en Europe et l'ouragan Hugo de 1989 aux États-Unis furent les deux premiers sinistres à coûter plus d'un milliard de dollars aux compagnies d'assurance. Trois ans plus tard, l'ouragan Andrew en Floride occasionna plus de 15,5 milliards de dollars de dommages assurés (24,6 milliards, prix 2008) et fut le premier d'une série de catastrophes à grande échelle.

Les événements climatiques extrêmes ont continué à occasionner des niveaux très élevés d'indemnisations d'assurance : 49 milliards de dollars en 2004, 87 milliards de dollars en 2005, puis 50 milliards en 2008[2]. L'ouragan Katrina à lui seul a coûté près de 48 milliards de dollars aux assureurs et réassureurs privés (prix 2008), l'événement causant à lui seul plus de pertes que l'ensemble de la décennie 1970 à l'échelle mondiale[3].

Le tableau 5.1-1 des 25 catastrophes les plus coûteuses pour le secteur de l'assurance au cours de ces mêmes 39 années montre que :

- ces catastrophes sont toutes survenues après 1987, et plus de la moitié d'entre elles depuis 2001 ;
- hormis les attaques terroristes du 11 septembre 2001 et le séisme de 1994 en Californie, ces catastrophes étaient *toutes* des événements climatiques ;
- les États-Unis ont clairement été les plus touchés, la France apparaissant à trois reprises dans ce tableau (en *italique*).

2 | Comment expliquer ce changement brusque

Les raisons de cette évolution récente sont multiples : 1) l'accroissement de la population dans les zones urbaines exposées ; 2) l'accroissement des valeurs dans ces mêmes zones à risque ; 3) la dégradation des habitats naturels ; 4) l'impact possible d'un changement de climat sur l'occurrence d'événements climatiques plus intenses.

En 2000, les villes comptaient 3 milliards d'habitants (50 % de la population mondiale), comparé à 0,75 milliard d'habitants en 1950 (30 % de la population mondiale d'alors). Elles compteront près de 5 milliards d'habitants en 2025 (60 % de la population mondiale) d'après les projections des Nations unies. Conséquence de cette évolution, les « méga-cités » de plus de 10 millions d'habitants se multiplient : en 1950, New York était la seule méga-cité dans le

[2]Ce montant exclut même les pertes assurées dues aux inondations de la Nouvelle-Orléans, qui ont coûté 18 milliards de dollars au système fédéral américain d'assurance inondation (*National Flood Insurance Program*) ; Michel-Kerjan (2010).

[3]Il faut aussi considérer l'accroissement de la capacité financière des compagnies d'assurance basées aux États-Unis (mesurée en « policyholders' surplus ») : 100 milliards de dollars en 1987, 300 milliards en 1997, 520 milliards de dollars en 2007. La récente crise financière a néanmoins un impact très important sur la capacité des assureurs à faire face à de grandes catastrophes dans un avenir proche (données communiquées à l'auteur par Swiss Re, AM Best et Insurance Information Institute).

Milliards de dollars	Événement	Victimes (décès ou portés disparus)	Année	Pays principalement touchés
48,1	Ouragan Katrina	1 836	2005	États-Unis, Golfe du Mexique. . .
36,8	Attaques terroristes	3 025	2001	États-Unis
24,6	Ouragan Andrew	43	1992	États-Unis, Bahamas
20,3	Séisme de Northridge	61	1994	États-Unis
16,0	Ouragan Ike	348	2008	États-Unis, Caraïbes...
14,6	Ouragan Ivan	124	2004	États-Unis, Caraïbes...
13,8	Ouragan Wilma	35	2005	États-Unis, Golfe du Mexique...
11,1	Ouragan Rita	34	2005	États-Unis, Golfe du Mexique...

Tableau 5.1-1
Les 25 catastrophes les plus coûteuses pour l'assurance mondiale – 1970-2008[4].

[4]Parce que nous nous focalisons ici sur les seules pertes assurées, plusieurs grandes catastrophes survenues récemment dans des pays pauvres où l'assurance est faible, voire quasi-inexistante, ne figurent pas dans ce tableau. C'est le cas par exemple du tsunami de décembre 2004 dans le Sud-Est asiatique qui a fait plus de 230 000 morts, de l'ouragan majeur Nargis (Myanmar) qui a tué 140 000 personnes en mai 2008, ou encore, le même mois, du séisme dans la région de Sichuan en Chine, pour ne citer que quelques exemples récents.

Milliards de dollars	**Événement**	**Victimes (décès ou portés disparus)**	**Année**	**Pays principalement touchés**
9,1	Ouragan Charley	24	2004	États-Unis, Caraïbes. . .
8,9	Typhon Mireille	51	1991	Japon
7,9	Ouragan Hugo	71	1989	Puerto Rico, États-Unis...
7,7	*Tempête Daria*	95	1990	*France, Royaume-Uni...*
7,5	*Tempête Lothar*	110	1999	*France, Suisse...*
6,3	Tempête Kyrill	54	2007	Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas, France
5,9	*Tempête et inondations*	22	1987	*France, UK...*
5,8	Ouragan Frances	38	2004	États-Unis, Bahamas
5,2	Tempête Vivian	64	1990	Europe de l'ouest/centrale

Tableau 5.1-1
Suite.

Milliards de dollars	Événement	Victimes (décès ou portés disparus)	Année	Pays principalement touchés
5,2	Typhon Bart	26	1999	Japon
5,0	Ouragan Gustav	153	2008	États-Unis, Caraïbes...
4,7	Ouragan Georges	600	1998	États-Unis, Caraïbes
4,4	Tempête tropicale Alison	41	2001	États-Unis
4,4	Ouragan Jeanne	3 034	2004	États-Unis, Caraïbes...
4,0	Typhon Songda	45	2004	Japon, Corée du Sud
3,7	Tempête	45	2003	États-Unis
3,6	Ouragan Floyd	70	1999	États-Unis, Bahamas, Colombie

Note : Prix indexés 2008 – Kunreuther, Michel-Kerjan (2009).

Tableau 5.1-1
Suite.

monde ; quarante ans plus tard, on en comptait 12 ; d'ici 2015, il y en aura 26, dont Tokyo (29 millions d'habitants), New York et Shanghai (18 millions), et Los Angeles (14 millions) (Crossett *et al.,* 2004). Or, nombre de ces mégalopoles sont potentiellement exposées à des événements climatiques ou sismiques de grande ampleur (sous-chapitre 3.3).

Parallèlement, de plus en plus de personnes vivent sur les côtes, et sont donc exposées aux tempêtes et inondations. C'est actuellement le cas d'une large part de la population aux États-Unis. L'État de Floride est emblématique à cet égard, avec ses retraités qui, attirés par la clémence du climat, ont contribué à une augmentation fulgurante de la population : 2,8 millions de personnes en 1950, le double en 1970, encore le double en 1990 (13 millions). En 2010, près de 19 millions de personnes vivent en Floride, augmentant d'autant la vraisemblance de pertes sévères sous l'effet d'ouragans de grande ampleur, à moins que soient prises rapidement des mesures pour réduire l'exposition. Si demain survenait un ouragan identique à celui qui a touché la Floride en 1926, il occasionnerait des pertes économiques deux fois plus importantes que celles résultant de Katrina en 2005, du seul fait de l'augmentation des valeurs exposées (Pielke *et al.,* 2008).

L'augmentation rapide des populations urbaines et côtières conduit à un troisième facteur d'aggravation de vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes : la dégradation des protections naturelles. En de nombreux pays, les villes se sont construites au détriment d'écosystèmes qui opposaient des barrières naturelles aux tempêtes et aux inondations. Cette dégradation s'est produite au fil des ans, voire des décennies, augmentant d'autant le coût de restauration d'indispensables services naturels (chapitres 1 et 2).

Quatrième raison de cette évolution, le changement climatique, tel qu'on peut l'observer et l'anticiper pour les décennies à venir, risque d'amener des événements climatiques plus extrêmes, même si la mesure de leurs effets est encore sujette à incertitude scientifique (IPCC, 2007)[5]. En tout état de cause, nous serons vraisemblablement témoins de tempêtes plus intenses (voire plus nombreuses aussi dans le bassin atlantique dû à un retour sur un cycle intense d'ouragans), d'épisodes de sécheresses et de canicules plus marquées et d'inondations majeures répétées (notamment du fait de l'élévation du niveau de la mer)[6].

---

[5] Pour plus de détails, on se rapportera aux nombreuses études parues au cours des dernières années, dans les revues *Science* et *Nature* notamment.

[6] L'année 2005 a vu une série d'ouragans très intenses se former dans le bassin atlantique et fut une année record pour la température de la surface de l'eau dans le Golfe du Mexique (l'intensité des ouragans dépend de manière exponentielle de la température de l'eau). Le consensus scientifique est cependant loin d'être réalisé sur le lien entre la survenance de tempêtes plus dévastatrices et un changement du climat (voir encadré 2 dans l'introduction).

3 | Catastrophes, finance et politique

Ces quatre raisons combinées créent les conditions de catastrophes plus amples et plus fréquentes. D'où un accroissement notable de la volatilité d'une année à l'autre et une incertitude guère appréciée des assureurs. De plus, ces quatre raisons tiennent essentiellement à des activités humaines en évolution, amenant une « incertitude endogène dynamique ». Les événements d'origine naturelle deviennent des catastrophes du fait de l'action humaine (Michel-Kerjan, 2006).

Les catastrophes en série de ces dernières années ont été autant de chocs pour les marchés d'assurance, en particulier aux États-Unis. La capacité des assureurs privés à couvrir des risques en différentes zones exposées dépend de l'indépendance des risques et leur agrégation d'exposition (les assureurs couvrent un certain nombre de personnes et d'entreprises mais pas plus, sinon ils encourent des pertes cumulées très sévères) (World Economic Forum, 2008). Cette capacité dépend aussi de la possibilité de transférer une part de leur exposition aux réassureurs mondiaux et investisseurs sur les marchés financiers[7], et de fixer un prix de couverture qui reflète le niveau de risque de leurs assurés et le coût du capital, tout en leur permettant un certain profit. Or, suite aux ouragans de 2004 et 2005, le prix de la réassurance des catastrophes aux États-Unis a augmenté – radicalement – de 75 % entre juillet 2005 et juin 2006 au niveau national, et de 150 % pour les assureurs opérant uniquement en Floride (jugés plus exposés). D'après une récente étude du Center for Risk Management de la Wharton Business School à Philadelphie, en collaboration avec la Georgia State University à Atlanta et l'Insurance Information Institute de New York, les primes d'assurance habitation en Floride (qui incluent la couverture contre les effets du vent mais pas l'inondation) ont en moyenne plus que doublé entre 2002 et 2007 (passant de 723 à 1 465 dollars par an). Sur les régions côtières, le prix a triplé, voire quadruplé, malgré une régulation des marchés d'assurance très contraignante pour les assureurs dans cet état (Kunreuther, Michel-Kerjan, 2009).

Nonobstant ces augmentations de prix, les assureurs craignent que les sept ouragans de 2004 et 2005 ne soient révélateurs d'une nouvelle ère, celle de catastrophes à répétition très coûteuses, susceptibles de les conduire rapidement à la ruine. Après des saisons d'ouragans relativement calmes en 2006 et 2007, l'année 2008 a vu de nouveau des ouragans très dévastateurs toucher le

[7] Plusieurs nouveaux instruments financiers ont été créés depuis le milieu des années 1990 pour transférer une part de l'exposition catastrophe directement sur les marchés financiers plutôt qu'à travers de l'assurance et réassurance traditionnelles (options sur indice, obligations indexées, swaps, sidecars – Michel-Kerjan et Morlaye, 2008).

pays[8]. Certains grands assureurs refusent purement et simplement de renouveler leurs polices d'assurance dans les régions exposées au risque d'ouragan. *State Farm*, le plus grand assureur de l'État du Mississippi qui a subi de plein fouet les conséquences de Katrina, a arrêté d'y vendre de nouvelles polices d'assurance habitation et a officiellement annoncé au printemps 2009 qu'il comptait se retirer de l'État de Floride. *Allstate*, l'autre géant de l'assurance habitation aux États-Unis, a fait de même dans plusieurs autres États américains.

La situation est particulièrement critique en Floride du fait de la croissance fulgurante des valeurs exposées. Aujourd'hui près de 2 400 milliards de dollars de biens assurés se situent sur les côtes de Floride (contre 1 900 milliards fin 2004)[9]. C'est donc une véritable bombe à retardement au regard d'ouragans potentiellement plus nombreux et plus intenses à l'avenir.

La réaction du gouvernement de Floride a néanmoins surpris : plutôt que d'élever le prix de l'assurance comme un signal d'exposition accrue au risque (ce qui pourrait inciter les résidents à investir dans des mesures de réduction de ce risque), le gouvernement a passé de nouvelles lois en 2007 autorisant l'assureur de dernier ressort géré par l'État, Citizens, à concurrencer les assureurs privés en vendant des polices d'assurance à prix artificiellement bas. Avant 2005, Citizens ne représentait que 2 à 3 pourcent du marché. Sans surprise, cette nouvelle politique de prix bas a vite fait de cet assureur d'État le plus grand assureur de Floride. Or, comme assureur de dernier ressort, Citizens a la possibilité légale de répercuter son déficit global sur tous les autres assureurs opérant dans l'État, donc contre ses concurrents. De plus, Citizens est largement réassuré auprès du Florida Hurricane Catastrophe Fund (FHCF), le réassureur public de Floride (à hauteur de 10 milliards de dollars en 2009), qui peut lui aussi répercuter son déficit sur les assureurs privés. Début 2009, l'exposition de Citizens était de 422 milliards de dollars et de plus de 1 500 milliards pour le FHCF ; ce dernier ne disposant que de 2,8 milliards de réserves. Il est donc bien clair que ces assureurs et réassureurs d'État hybrides dans leur fonctionnement souffriront d'un déficit majeur si une nouvelle série d'ouragans de grande ampleur touche la région dans les années à venir. Leurs déficits seront alors transférés aux assureurs privés opérant en Floride, à charge pour eux de récupérer ces sommes sur leurs propres assurés à travers une augmentation de prime (comme

[8]L'ouragan Ike, en septembre 2008 – près de 16 milliards de dollars de dommages assurés – constitue le troisième ouragan le plus dévastateur à toucher les côtes des États-Unis, bien que les médias en aient relativement peu parlé, la crise financière monopolisant alors l'attention.

[9]Notons ici que 40 % des 5,6 millions de polices d'assurance inondation vendues aux États-Unis par le National Flood Insurance Program (NFIP) le sont en Floride. En 2004 et 2005, plus de 80 % des remboursements d'assurance inondation dans cet état étaient liées aux ouragans poussant l'eau de l'océan à l'intérieur des terres (Michel-Kerjan et Kousky, 2008).

ce fut déjà le cas en 2004 et 2005)… Il n'est donc pas étonnant de voir plusieurs grands assureurs privés quitter ce marché.

Conclusion

Ce rapide aperçu de quelques grandes questions posées au financement des événements climatiques extrêmes l'indique : nous sommes entrés dans une nouvelle ère de risques à grande échelle. Cette nouvelle ère appelle un nouveau modèle de gouvernance, dont la composante financière est un pilier essentiel.

Paradoxe au pays du libéralisme économique, la survenance de plusieurs grandes catastrophes depuis 2001 a brutalement reformulé la question de la couverture financière des grands risques aux États-Unis. Qui doit payer ? Comment utiliser l'architecture d'assurance pour inciter à la prévention dans le contexte d'un changement de climat ? Fondamentalement, il s'agit aux États-Unis de redistribuer les rôles et les responsabilités entre les secteurs privé et public, pour le moment en faveur de ce dernier. Mais pour combien de temps les contribuables américains accepteront-ils de payer pour ceux qui décident de vivre dans les zones extrêmement exposées du pays ?[10]

Que ces mêmes questions aient été largement discutées lors de la conférence internationale sur le climat de Copenhague en décembre 2009 est une reconnaissance officielle forte de ces nouveaux enjeux. Cela démontre certainement le chemin à suivre pour réfléchir collectivement à de nouvelles solutions en réponse aux événements extrêmes à venir.

En France, le système « catnat » établi 1982 rend obligatoire cette couverture catastrophe[11]. Il repose sur un principe de solidarité nationale (tous les assurés paient à leur assureur la même surprime, 12 % de leur prime d'assurance incendie, indépendamment du risque auquel ils sont exposés). Il ne s'agit donc pas véritablement d'un marché d'assurance, car le prix de cette couverture d'assurance catastrophe n'est pas fixé par le jeu de l'offre et de la demande. De leur coté, les assureurs bénéficient d'une réassurance d'au moins 50 % de leur exposition auprès du réassureur public, la Caisse centrale de réassurance (CCR) ;

[10] Voir notamment le rapport économique annuel du Président américain qui pour la première fois en 2007 dédiait un chapitre entier à la question de la réforme de l'assurance catastrophe (White House, 2007).

[11] Il couvre notamment contre les inondations, les séismes, les sécheresses, les avalanches ou encore les raz-de-marée, mais non contre les effets du vent, qui sont couverts exclusivement par l'assurance de marché au titre de la garantie tempête.

la CCR dispose elle-même d'une garantie illimitée de l'Etat, ce qui la rend extrêmement compétitive puisque le risque de défaut est donc nul[12]. Côté effort de prévention, le système n'y incite guère puisque le prix de l'assurance ne varie pas en fonction de l'exposition au risque. Cet aspect a été analysé très largement depuis plus de dix ans, sans qu'aucune réforme ne l'ait fondamentalement modifié (Bourelier *et al.*, 2000 ; Godard *et al.*, 2002 ; Von Ungern-Sternberg, 2002 ; Latruffe et Picard, 2005). Cette même question de la réforme du système catnat français a été de nouveau discutée dans un récent rapport d'information du Sénat sur l'indemnisation des victimes de la sécheresse de 2003 (Sénat, 2009).

Même avec les tempêtes de 1999 et des sécheresses à répétition coûteuses, le système n'a pas souffert – jusqu'à présent au moins – de catastrophe d'ampleur comparable à celle de Katrina (Godard *et al.*, 2002)[13]. Comment le marché d'assurance et les pouvoirs publics français réagiraient à des catastrophes climatiques de grande ampleur en série, et si, et comment, le système catnat en serait modifié, reste une question ouverte.

À notre connaissance, il n'y a pas à ce jour en France d'initiative concertée de haut niveau étudiant cette question de manière approfondie. L'exemple des États-Unis montre pourtant qu'une réfection de fond, avant que de telles catastrophes ne surviennent, est de première importance ; sauf à penser que les assureurs et/ou l'État français paieront en toutes circonstances.

Contribution aux recommandations. Il est nécessaire de redéfinir le rôle et la responsabilité des secteurs public et privé dans le développement de nouvelles solutions de couverture financière mieux adaptées à l'époque actuelle de catastrophes à grande échelle. Un nombre croissant de pays reconnaissent le caractère stratégique de cette question (à la fois au plan de la compétitivité et au plan politique) et la portent désormais au plus haut niveau décisionnel (par la mise en place de commissions présidentielles notamment). De manière surprenante, la France reste encore bien timide dans la reconnaissance de cette vulnérabilité accrue. Notre pays aurait tout avantage à diriger une initiative d'envergure sur le sujet, prenant par là-même le leadership au niveau européen. Mais cela doit être pensé comme un élément de stratégie nationale, et donc entrepris avec force avant que de nouvelles catastrophes ne surviennent. En absence de telles

[12]À titre d'illustration, on estime que les dommages directs assurés associés à une inondation centennale en région parisienne, comme celle de Paris en 1910, seraient de l'ordre de 5 milliards d'euros. Étant donné les réserves actuelles de la CCR et les contrats de réassurance en place, les assureurs privés seraient responsables pour 1,5 milliards d'euros, et la CCR pour 3,5 milliards (dont 1 milliard payé par l'État français) (CCR, 2008).

[13]Ceci étant, le montant de la surprime pour cette extension de garantie a néanmoins augmenté considérablement en 2000, passant de 9 à 12 %, soit une augmentation de plus de 30 % en valeur absolue.

actions concertées, et étant donné notre connaissance actuelle de nos vulnérabilités, la question, au lendemain de la prochaine catastrophe, ne sera pas seulement financière, elle sera certainement, aussi, celle de la responsabilité des dirigeants.

Références bibliographiques

Bourrelier P-H., Deneufbourg G., de Vanssay B. (2000). *Les catastrophes naturelles : Le grand cafouillage*, Éditions Eyrolles, Paris.

CCR. (2008). *Les catastrophes naturelles en France*. Paris, Caisse centrale de réassurance, septembre.

Crossett KM. *et al.* (2004). *Population Trends Along the Coastal United States: 1980-2008.* NOAA's National Ocean Service, Special Projects: Silver Spring, MD.

Godard OP., Henry C., Lagadec P., Michel-Kerjan E. (2002). *Traité des nouveaux risques. Précaution, Crise, Assurance*. Éditions Gallimard, Folio, Inédit Numéro 100, Paris, 620 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* ML. Parry, OF. Canziani, JP. Palutikof, PJ. van der Linden and CE. Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

Kunreuther H., Michel-Kerjan E. (2009). *At War with the Weather: Managing Large-scale Risks in a New Era of Catastrophes.* MIT Press. Cambridge, MA, USA, 448 p.

Latruffe L., Picard P. (2005). Assurance des catastrophes naturelles : faut-il choisir entre prévention et solidarité ? *Annales d'Économie et de Statistique*, **78**: 33-56.

Michel-Kerjan E. (2006). Couverture financière des « risques à grande échelle » : la parole est à la première industrie au monde. *Annales des Mines,* 43, juillet 2006.

Michel-Kerjan E., Morlaye F. (2008). Extreme Events, Global Warming, and Insurance-Linked Securities: How to Trigger the 'Tipping Point' ? *The Geneva Papers on Risk and Insurance,* **33**: 153-176.

Michel-Kerjan E., Kousky C. (2008). Come Rain or Shine: Evidence on Flood Insurance Purchases in Florida. Working paper, The Wharton School, University of Pennsylvania and Kennedy School of Government, Harvard University, *Journal of Risk and Insurance.*

Michel-Kerjan E., Slovic P. (2010). *The Irrational Economist. Making Decisions in a Dangerous World*. Public Affairs Press, New York, USA, 352 p.

Michel-Kerjan E. (2010). Flood Insurance in the United States. *Journal of Economic Perspectives.*

Sénat (2009). Rapport d'information (numéro 39) du groupe de travail sur la situation des sinistrés de la sécheresse de 2003 et le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles constitué par la commission des finances. J-C Frécon et F. Keller, rapporteurs ; enregistré à la Présidence du Sénat le 14 octobre 2009, Paris.

Pielke R. Jr *et al*. (2008). Normalized Hurricane Damage in the United States: 1900–2005. *Natural Hazard Review,* **9**: 29-42.

Von Ungern-Sternberg T. (2002). *L'Assurance Immobilière en Europe : les Limites de la Concurrence.* Economica, Paris.

Weitzman M. (2009). On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change. *Review of Economics and Statistics,* **91**: 1-19.

Weitzman M. (2007). A Review of the *Stern Review on the Economics of Climate Change. Journal of Economic Literature,* **45**: 703-724.

White House (2007). *Economic Report of the President.* Washington, DC.

World Economic Forum (2008). *Global Risk Report 2008.* Geneva.

Zajdenweber D. (2009), *Économie des extrêmes*. Flammarion, Paris (deuxième édition).

SOUS-CHAPITRE 5.2

Impact macroéconomique des catastrophes naturelles : mécanismes d'amplification et frein au développement

STÉPHANE HALLEGATTE ET PATRICE DUMAS

Par construction, les modèles économiques d'équilibre ne peuvent pas représenter les courtes échelles de temps. Les événements extrêmes n'y sont pris en compte qu'à travers leur impact moyen, *via* un abaissement de productivité *moyenne*, alors que l'effet principal des catastrophes est une destruction ponctuelle du capital productif et du patrimoine bâti. Or, modéliser les catastrophes par des réductions de productivité ou par des destructions ponctuelles de capital n'est pas équivalent, notamment en raison des non-linéarités du système économique.

Laisser de côté les non-linéarités revient à négliger une facette importante du problème. Ainsi, les 100 milliards de dollars de dommages dus au cyclone Katrina en Louisiane en 2005 représentent moins de deux semaines d'investissement aux États-Unis. Dans un modèle de croissance classique, on représenterait donc un tel désastre comme une bénigne perte de deux semaines

d'investissement, à cause de l'effet d'éviction des dépenses de reconstruction sur l'investissement productif. Une telle estimation serait erronée au vu des graves conséquences de Katrina, qui vont s'étaler sur plus de 5 ans et non sur deux semaines. Ceci montre l'importance de l'analyse des effets de court terme et de la prise en compte des impacts indirects, des conséquences sociales et redistributives des catastrophes et des contraintes sur la reconstruction.

1 | Coûts indirects des catastrophes et dynamiques de reconstruction

Une façon plus acceptable de prendre en compte les catastrophes est de les modéliser une par une, par des destructions du capital productif, en utilisant des modèles économiques capables de reproduire les effets de court terme et de déséquilibre. Ceci demande toutefois des développements spécifiques. Deux écueils doivent en effet être contournés (Hallegatte *et al.,* 2007). Premièrement, si on utilise une fonction de production conventionnelle avec des rendements décroissants, alors la destruction de x pourcent du capital productif par un désastre réduit de moins que x pourcent la production, exactement comme si l'on avait décidé d'investir x pourcent en moins. On se trouve dans une situation où décider d'investir moins équivaut à subir une catastrophe qui détruit une partie du capital installé. Or, il est très différent de décider d'investir moins en choisissant de ne pas réaliser les projets les moins profitables, et de voir une catastrophe détruire une partie non choisie du capital. Ainsi, contrairement à des investissements ou désinvestissements « normaux » et choisis, les dommages des catastrophes nécessitent d'appliquer des rendements constants, donc d'introduire une fonction de production spécifique.

Deuxièmement, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes de court terme qui freinent la reconstruction. Si l'on néglige ces contraintes, les modèles suggèrent que la reconstruction ne durerait que quelques mois, même pour les plus grandes catastrophes, ce qui est contredit par l'observation des événements passés (tempêtes de l'hiver 1999 en Europe, inondations de 2002 en Europe centrale, cyclones de 2004 en Floride). Ces contraintes sont d'abord financières, quand les ménages et les entreprises ne peuvent payer la reconstruction. Ceci est particulièrement important dans les pays pauvres (Freeman *et al.,* 2002 ; Mechler *et al.,* 2006). Ces contraintes sont aussi techniques, et concernent notamment le manque de travailleurs qualifiés et d'équipements de construction. Ces contraintes conduisent aussi à l'inflation du prix des biens et services requis pour la reconstruction à la suite des catastrophes (par exemple, Benson and Clay, 2004 ou RMS, 2005). Ainsi, le nombre de fenêtres endommagées lors de la catastrophe AZF à Toulouse a largement dépassé la capacité de réparation des vitriers, malgré l'arrivée de vitriers de toute la France, ralentissant et renchérissant la reconstruction.

Ces contraintes peuvent augmenter considérablement le coût total d'une catastrophe en rallongeant la durée de la période de reconstruction. Au coût de remplacement d'une usine détruite, il faut en effet ajouter la perte de production pendant le délai réel de reconstruction, qui peut atteindre plusieurs années. De même, la destruction d'une maison qui ne peut être reconstruite avant un an a un coût total égal au coût de reconstruction de la maison, plus la valeur d'un an de « service logement » produit par la maison. La valeur de cette perte de production au sens le plus large peut être très élevée, surtout quand des besoins fondamentaux sont en jeu (logement, santé, emploi, etc.). Si on suppose que Katrina a détruit pour 100 milliards de dollars de capital, et que ce capital va être remplacé sur une période comprise entre 5 et 10 ans, et si on utilise une productivité moyenne du capital de 23 %[1], on peut estimer les pertes de production dues à Katrina entre 58 et 117 milliards de dollars. La prise en compte de la perte de production augmente donc le coût total de la catastrophe d'entre 58 et 117 %. Et on ne considère pas ici :

– les rétroactions macroéconomiques, *via* les pertes d'emplois par exemple ;
– les effets redistributifs, les plus pauvres étant souvent les plus touchés ;
– les conséquences sociales, que les victimes de Katrina n'ont pas fini de subir (Hallegatte, 2008).

Il est utile de noter que les conséquences des catastrophes naturelles, et plus particulièrement les dynamiques de reconstruction, peuvent différer sensiblement selon l'état préexistant de l'économie touchée. En situation de pauvreté, les ressources nécessaires à la reconstruction ne seront pas forcément disponibles, ce qui rend les pays les plus pauvres particulièrement vulnérables aux catastrophes naturelles. La situation économique conjoncturelle peut également jouer un rôle important : paradoxalement, les économies en récession sont potentiellement moins vulnérables aux conséquences des catastrophes naturelles que les économies en croissance. Ainsi, les destructions causées par le séisme de Marmara en Turquie en 1999 – 1,5 à 3 % du PIB turc – ont eu des conséquences relativement faibles en termes de perte de production car le pays était dans une forte récession, avec une réduction du PIB de 7 % l'année précédant le séisme : la reconstruction a relancé l'économie, compensant partiellement les pertes directes.

[1] Comme on considère la destruction d'une partie indéterminée du capital et non de l'ajout ou de retrait d'une partie choisie du capital, il faut utiliser la productivité moyenne et non la productivité marginale. Compte tenu du rôle particulier des infrastructures, cette hypothèse est même plutôt optimiste (Hallegatte *et al.*, 2007). La productivité marginale du capital aux États-Unis est d'environ 7 %. En supposant une fonction de production de Cobb-Douglas avec une répartition entre les revenus du capital et les revenus du travail de 30 %/70 %, la productivité moyenne du capital (Y/K) est 1/0,30 fois la productivité marginale (dY/dK). La productivité moyenne est donc proche de 23 %.

La prise en compte des déséquilibres économiques préexistants est primordiale pour comprendre ce « paradoxe de vulnérabilité ». Un événement extrême amplifie en effet les déséquilibres qui existent en phase de forte croissance du cycle économique (Hallegatte et Ghil, 2008), pour plusieurs raisons :

– les stocks des entreprises sont faibles, et ne peuvent compenser les pertes de production dues à la catastrophe ;

– le chômage est réduit, et il n'existe pas de « réservoir de main d'œuvre » disponible pour réaliser la reconstruction. En conséquence, la reconstruction est freinée et la demande de travailleurs supplémentaires conduit à une augmentation des salaires et à l'inflation ;

– les investisseurs ont peu de ressources disponibles pour financer la reconstruction.

À l'opposé, en période de récession, des capacités de production inexploitées existent et des travailleurs supplémentaires sont disponibles. L'économie peut profiter d'un effet de relance keynésienne, pour peu que ces capacités puissent être mobilisées pour réparer les dégâts de la catastrophe naturelle.

On peut aussi imaginer que les catastrophes naturelles conduisent à une modernisation accélérée de l'appareil productif, les réparations mettant en place un capital différent de celui qui a été détruit (usine modernisée à l'occasion d'une reconstruction, infrastructures mieux adaptées aux changements). Cet effet est rare cependant, les réparations amenant en général à reconstruire à l'identique : d'une part, il faut souvent restaurer le plus rapidement possible l'activité, ce qui rend les transitions techniques délicates ; d'autre part, les destructions sont rarement totales, et la possibilité de sauver une partie du capital en le réparant rend l'utilisation de nouvelles techniques moins intéressante. L'analyse de ces effets aboutit à des conclusions contradictoires (Hallegatte et Dumas, 2008) : s'il est considéré que toutes les réparations sont faites avec les meilleures technologies, les conséquences des événements extrêmes sont très amoindries. En revanche, si la reconstruction est faite à l'identique, les chocs sont au contraire amplifiés et le retour à la normale est plus lent. La réalité est probablement entre ces deux extrêmes.

2 | Séries de catastrophes naturelles et trappes à pauvreté

Le coût d'une catastrophe dépend fortement de la durée de la période de reconstruction, elle-même liée à la capacité de reconstruction de l'économie

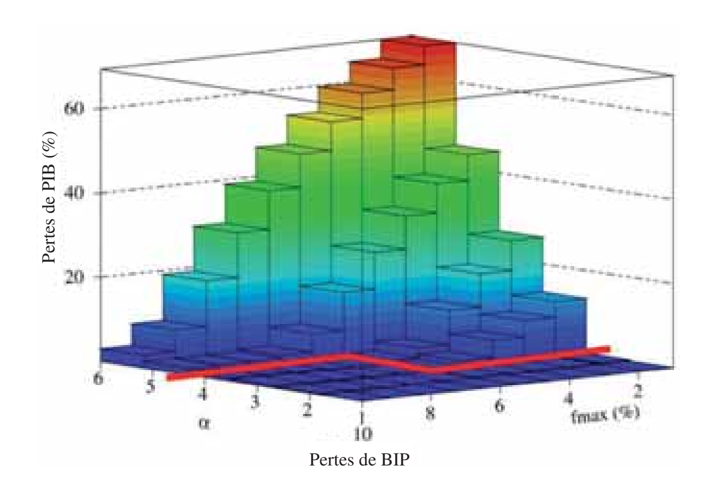


Figure 5.2-1
Pertes moyennes de PIB en fonction de la capacité de reconstruction et de la sévérité des catastrophes naturelles. Les axes horizontaux indiquent, à droite, la capacité de reconstruction, mesurée par f_{max} (une mesure de la proportion des investissements qui peut être utilisée pour la reconstruction), et à gauche, la sévérité des catastrophes naturelles dont la fréquence et l'intensité est mesuré par ? (quand ? est égal à 2, la fréquence et l'intensité sont multipliés par 2, donc le coût moyen est multiplié par 4). Pour chaque capacité de reconstruction et chaque indice de sévérité des catastrophes naturelles, la perte de PIB moyenne provenant d'une série de catastrophes naturelles correspond à la hauteur des barres, sur l'axe vertical. La ligne rouge départage une zone de faibles pertes d'une zone dans laquelle les pertes sont plus importantes. (Hallegatte et al.*, 2007).*

touchée. Or, les pays en voie de développement ne peuvent reconstruire aussi rapidement et efficacement que les pays riches. D'où l'existence de *trappes à pauvreté* dans lesquelles certains pays paraissent enfermés : ces pays, déjà pauvres, n'ont qu'une faible capacité à reconstruire après chaque catastrophe. Cette faible capacité s'ajoute souvent à une large exposition à des événements tels que cyclones tropicaux, inondations de mousson, sècheresses. Des catastrophes en série peuvent empêcher ces pays d'accumuler des infrastructures et du capital productif, donc de développer leur économie, et d'améliorer leur capacité à reconstruire après un désastre (Hallegatte *et al.,* 2007). Ces économies sont alors en état perpétuel de reconstruction. Ce cercle vicieux est illustré dans la figure 5.2-1 : les pertes moyennes de PIB dépendent d'un paramètre décrivant la fréquence et l'intensité des catastrophes (α) et d'un paramètre décrivant la capacité de reconstruction (f_{max}). Pour une capacité de reconstruction suffisante par rapport à la fréquence et à l'intensité des catastrophes, ces dernières n'ont pas de conséquence visible sur le PIB moyen et restent des événements ponctuels. Mais les pertes moyennes sont au contraire très grandes quand les catastrophes maintiennent le pays à un niveau inférieur de développement (par exemple le Guatemala depuis les années 1990), amenant à placer la capacité de gestion des risques de catastrophes au cœur des politiques de développement (Freeman *et al.*, 2002).

Avec l'augmentation possible de la fréquence et/ou de l'intensité des événements climatiques extrêmes, ces trappes à pauvreté pourraient s'élargir, affectant gravement le développement économique de certaines régions[2] particulièrement des plus pauvres (Freeman *et al.,* 2002). Dans une optique plus optimiste, ce résultat suggère aussi que si l'on est capable d'augmenter notre capacité de reconstruction, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes pourrait ne conduire qu'à des impacts macroéconomiques limités.

3 | Changement climatique, catastrophes naturelles et gestion des risques

Le changement climatique peut faire augmenter le coût de certaines catastrophes naturelles, en modifiant la distribution spatiale et l'intensité des canicules, sécheresses, et inondations en certaines régions. Ce risque, très bien décrit dans le Rapport Stern et d'autres articles (par exemple, Benson and Clay, 2004), n'a pourtant pas été pleinement pris en compte dans les évaluations des coûts économiques du changement climatique. En négligeant cet aspect du changement climatique, on risque tout simplement d'oublier l'essentiel des dommages.

Certes, le coût futur des événements extrêmes dépendra beaucoup de la façon dont les sociétés se montreront capables de gérer des risques en évolution : amélioration des infrastructures de défense contre les inondations, création et maintien de systèmes d'alerte efficaces, mise en œuvre des politiques de réduction de la vulnérabilité (normes de construction, plans locaux d'urbanisme), voire abandon de certaines zones où le risque devient trop grand. Les dommages peuvent rester limités dans les pays qui auront les moyens (financiers, techniques et institutionnels) de mettre en œuvre ces mesures d'une manière suffisamment anticipée. Sur des cas concrets, on constate que des politiques d'adaptation sont capables de maintenir le risque à son niveau actuel malgré le changement climatique, voire de la réduire (voir un exemple sur Copenhague dans Hallegatte *et al.*, 2008).

Mais les pays pauvres risquent de manquer de ressources pour de tels investissements. Et dans les autres pays, quelques expériences passées appellent à la prudence : la plupart du temps, quand les risques augmentent avec le temps, ils ne sont gérés correctement qu'après l'avènement d'une catastrophe majeure (par exemple, les Pays-Bas après les inondations de 1953 et leurs 1 800 victimes, ou la France après la canicule de 2003 et ses 15 000 victimes). Parfois, la répétition de catastrophes ne suffit même pas pour mettre en place des systèmes

[2]Cet impact des catastrophes naturelles s'ajoute aux autres contraintes environnementales subies par les pays en voie de développement, liées ou non au changement climatique.

rigoureux de gestion du risque (par exemple, la Nouvelle-Orléans inondée en 1915, 1947, 1965 et 2005). Notre capacité à gérer le risque avec anticipation, c'est-à-dire sans subir une catastrophe en guise de signal de l'augmentation du risque, est limitée, et il serait dangereusement trompeur d'évaluer les dommages du changement climatique en surestimant cette capacité d'anticipation.

Contribution aux recommandations. Une stratégie de gestion de risque efficace est un ensemble cohérent de politiques, visant : 1) à réduire l'exposition et la vulnérabilité (action ex ante*) ; 2) à faciliter la gestion de l'urgence en cas d'événement ; 3) à augmenter la capacité de l'économie à reconstruire à la suite d'un événement, grâce à des politiques d'assurance, de partage du risque et de support aux acteurs affectés.*

En termes de recherche, il faut associer les recherches sur les aléas et les pertes directes (dommages sur le bâti et les infrastructures par exemple), et les recherches sur la réponse de l'économie à des chocs. Il s'agit donc de recherches très interdisciplinaires.

Références bibliographiques

Benson C., Clay E. (2004). *Understanding the economic and financial impact of natural disasters.* The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, Washington D.C.

Freeman P.K. *et al.* (2002). *Catastrophes and Development, integrating natural catastrophe into development planning.* Disaster Risk Management Working Paper Series.

Hallegatte S. (2008). An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. *Risk Analysis,* **28**.

Hallegatte S. *et al.* (2007). Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: illustration on extreme events. *Ecological Economics,* **62**: 330-340.

Hallegatte S., Dumas P. (2009). Can natural disasters have positive consequences ? Investigating the role of embodied technical change. *Ecological Economics,* **62**: *777-786.*

Hallegatte S., Ghil M. (2008). Natural disasters impacting a Macroeconomic Model with Endogenous Dynamics. *Ecological Economics,* **68**: 582-592.

Hallegatte S. *et al.* (2008). *Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Study on Copenhagen*. OECD Environment Working Paper No. 3 ENV/WKP(2008)2.

Mechler R. *et al.* (2006). Public sector financial vulnerability to disasters, in Birkmann J. (Ed.). *Measuring Vulnerability and Coping Capacity to Hazards of Natural Origin – Toward Disaster Resilient Societies*. United Nations University Press, Tokyo.

CHAPITRE 6

Justice et équité

HENRI DÉCAMPS, VÉRONIQUE ANCEY, MÉLANIE REQUIER-DESJARDINS

La justice et l'équité ne peuvent se satisfaire de la plus grande vulnérabilité des pays pauvres aux variations climatiques, extrêmes ou non. Deux principes doivent soutenir une plus grande ambition dans la réduction de cette vulnérabilité : prévenir tout changement climatique dangereux et donner la priorité aux plus vulnérables. Des actions concrètes, impliquant les populations en place, sont en ce sens indispensables. L'exemple des sociétés pastorales sahéliennes illustre toute la complexité des problèmes de justice et d'équité pour des populations qui ont su répondre dans le passé aux contraintes spécifiques à leur milieu. Ce chapitre évoque diverses actions concrètes en cours dans les pays du Sahel, ainsi qu'au Bangladesh.

Les populations des pays pauvres souffrent plus durement que les autres des sécheresses, tempêtes et inondations. Leur situation est déjà injuste et inéquitable du strict point de vue du changement climatique qu'elles subissent sans en être responsables. Elle est particulièrement préoccupante du point de vue des événements extrêmes auxquels ces populations sont d'autant plus vulnérables qu'elles disposent de faibles capabilités[1], ce qui limite fortement leurs possibilités de choix pour faire face à l'adversité. Cette situation s'avère par ailleurs dangereuse car potentiellement source de conflits. Réduire la vulnérabilité des pays pauvres aux variations climatiques – extrêmes ou pas – suppose une plus grande ambition et des actions concrètes sur le terrain (encadré 6.1). Nous évoquons ici l'exemple des populations nomades et sédentaires des pays du Sahel.

1 | Deux principes pour une plus grande ambition

Dès 1992, la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques se souciait de la responsabilité des pays développés vis-à-vis des pays en développement. Un même souci s'applique aux événements extrêmes : comment aider ces pays à réduire leur vulnérabilité ? Cette question est liée aux luttes contre le changement climatique et pour le développement de ces pays. Elle appelle deux principes (Paavola et Adger, 2006) : prévenir tout changement climatique dangereux et donner la priorité aux plus vulnérables.

– Prévenir tout changement climatique dangereux

La convention cadre des Nations unies (1992) sur le changement climatique préconisait de « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui évite les interférences dangereuses avec le système

[1] Les capabilités représentent « l'ensemble des modes de fonctionnement humain qui sont potentiellement accessibles à une personne, qu'elle les exerce ou non » (Sen, 1992).

climatique ». Elle recommandait d'atteindre ce niveau suffisamment vite pour permettre une adaptation naturelle des écosystèmes, écarter toute menace sur la production alimentaire et assurer un développement économique soutenable.

Quel seuil ne pas dépasser dans cette perspective ? Il paraît nécessaire de limiter l'augmentation de la température globale moyenne à 2 °C par rapport à la période préindustrielle (y compris les 1,4 °C inévitables car déjà atteints ou en passe de l'être, ce qui laisse 0,6 °C de marge de manœuvre). Cette limitation implique de rester en deçà d'une concentration globale en CO_2 atmosphérique de 400 ppm, soit 450 ppm équivalent CO_2 (Walker et King, 2008). Défi considérable, qu'il est encore possible de relever en s'y prenant d'urgence.

– **Donner la priorité aux plus vulnérables**

La convention cadre de 1992 soulignait aussi la nécessité de prendre en compte les préoccupations des pays en développement face aux méfaits d'une augmentation de la température moyenne globale : pénurie d'eau, baisse de la productivité agricole en Afrique et en Asie (Yohe, 2007). Ces méfaits risquent d'affecter en priorité les îles basses, les côtes, les zones arides et semi-arides.

Les populations de ces régions ont souvent plus de difficulté que les autres à anticiper les impacts, à leur faire face, à leur résister, à s'en rétablir. Elles dépendent de revenus aléatoires et souffrent de politiques nationales déficientes en matière de santé, d'éducation, de protection du capital naturel, d'institutions (Wisner *et al.,* 2004).

Une plus grande ambition

Les événements climatiques extrêmes frappent donc plus durement les populations qui sont les moins équipées pour y faire face – et qui ont le moins émis de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les pays développés ont la responsabilité morale d'aider ces populations à faire face aux dommages à venir, indépendamment de leur intérêt à atténuer les implications de migrations massives.

Concrètement, le « mécanisme de développement propre » (MDP) du protocole de Kyoto permet à un pays riche d'obtenir un crédit d'émission en mettant en place un programme de réduction d'émission de gaz à effet de serre dans un pays pauvre. L'idée est de diminuer le coût des réductions d'émissions des pays développés tout en permettant aux pays en développement d'acquérir de nouvelles technologies économes en carbone. Le protocole de Kyoto a été sur ce point un pas important vers plus de justice et d'équité. Il n'est cependant pas exempt de critiques, et des améliorations sont indispensables.

Le nouveau protocole de 2012 devra faire preuve d'une plus grande ambition dans son souci de répartir équitablement la charge de la lutte contre le changement climatique. Il devra prendre en compte les différents stades de développement, les responsabilités historiques, imaginer plus de flexibilité, d'efficacité, de réalisme, améliorer les méthodes de comptabilité, obtenir l'agrément des gouvernements sur de nouveaux standards de réduction (Walker et King, 2008). Il devra s'inspirer de propositions nouvelles, visant par exemple à réduire la déforestation (Santilli *et al.,* 2005), et mieux alimenter les fonds globaux d'aide aux pays les moins développés.

Un développement économe en carbone associé à une lutte contre la pauvreté est susceptible de réduire la vulnérabilité des pays pauvres aux événements climatiques extrêmes. Il y a urgence : 9 milliards d'humains peupleront la planète en 2050.

2 | Les sociétés pastorales sahéliennes

Les sociétés pastorales sahéliennes illustrent toute la complexité des problèmes de justice et d'équité, pour des sociétés qui, par leur système de vie et de production, ont su répondre dans le passé aux contraintes spécifiques à leur milieu.

Les pasteurs considèrent la sécheresse comme un risque structurel. Ils ont pris en compte « la possibilité de la sécheresse » dans leur système social et économique (Bovin, 2000). Dans un univers globalement incertain, ils réagissent en combinant des solutions adaptatives complexes, où l'accès aux ressources, par exemple, mobilise plusieurs compétences (savoir-faire, dotation familiale en main d'œuvre et bétail, lien social).

En fait, une grande diversité caractérise le contexte pastoral. La vulnérabilité des pasteurs sahéliens dépend de leur exposition, de leur sensibilité, de leur réactivité. Elle dépend de la protection de leurs droits civiques et sociaux par les pouvoirs publics. Les mesures à prendre diffèrent selon les populations considérées et les circonstances : mesures d'urgence, appuis institutionnels de prévention, alertes précoces (Bollig et Göbel 1997, Lead/sipsa 2005).

Dans ce contexte, toute réduction des inégalités dépend des priorités choisies. S'il s'agit des inégalités internes aux sociétés d'élevage, il convient :

– d'aider à reconstruire les moyens de vie des populations les plus vulnérables, démunies de leur bétail (aide alimentaire, travail contre nourriture, ventes subventionnées) ;

– d'atténuer les chocs frappant les familles les plus nombreuses (aide à l'entretien ou à la vente du bétail et à l'achat de céréales, appui à la mobilité) ;

– de diminuer la sensibilité aux risques des familles capables d'investir dans des activités de diversification.

S'il s'agit de réduire les inégalités entre les populations pastorales en majorité nomades, et les populations agricoles sédentaires, il convient d'améliorer les capacités de suivi, d'alerte et de décision des gouvernements face aux sécheresses et autres contraintes – en fait, d'améliorer la visibilité des populations pastorales dans des systèmes d'information aujourd'hui très orientés vers les productions et les populations agricoles.

Les pouvoirs publics des pays comprenant une zone sèche (moins de 400 mm de pluies annuelles moyennes) ont donc à suivre les interactions entre les populations pastorales et leur environnement, afin d'anticiper une aggravation dangereuse des contraintes biologiques, spatiales et socio-économiques. Le choix des indicateurs est ici essentiel, qu'il s'agisse de mesurer la capacité de mobilité et d'accès aux marchés, principaux supports de reproduction des systèmes de vie et de production pastoraux, de rendre compte de l'état et des stratégies économiques (présence de charrette, taille moyenne du troupeau par famille, diversité des espèces élevées, des activités. . .), de renseigner sur la disponibilité des ressources (infrastructures publiques, nombre de forages et mares).

Le traitement de la crise pastorale au Niger en 2004-2005 a pâti d'une interprétation tardive de la nature et de l'ampleur du phénomène, malgré des dispositifs de suivi relativement sophistiqués ; il a manqué de recul sur les tendances longues d'appauvrissement dont la crise n'a été que le révélateur. Cette crise a également révélé la forte résilience des pasteurs possédant des troupeaux susceptibles de transhumer, se déplaçant tôt et accédant aux ressources naturelles stratégiques, ou recourant à des réseaux de capitaux et de travail transfrontaliers, à condition de trouver place dans des espaces fonciers et juridiques.

La période actuelle marque une évolution des populations pastorales. Les liens de réciprocité face aux risques internes s'affaiblissent. Les besoins de mobilisation collective contre les risques externes s'accroissent avec le changement des espaces pastoraux, des droits fonciers, des marchés, de la représentation démocratique. Les comportements enfin se transforment en même temps que changent la notion d'intérêt général, les dimensions des collectifs, la capacité de négociation institutionnelle. . . Face à ces évolutions, l'avenir des sociétés pastorales dépend de leur capacité à adapter leurs rapports sociaux à leur environnement. Il dépend de la place que leur accorderont les gouvernements, autant que des risques climatiques structurels.

3 L'initiative Grande Muraille Verte au Sahara et au Sahel

Cette initiative de la Communauté des États Sahélo-sahariens (CEN SAD) et de l'Union africaine vise à aider les populations affectées par la dégradation des terres et la sécheresse. Elle s'adresse non aux populations nomades mais aux populations essentiellement sédentaires : il s'agit de résoudre les problèmes environnementaux transfrontaliers en renforçant la solidarité interrégionale. La Grande Muraille Verte s'appuie sur une mobilisation des financements au niveau international, une capitalisation des acquis scientifiques et techniques, et les savoir-faire locaux. Les institutions et les bénéficiaires locaux sont associés aux réalisations pratiques de l'initiative.

Entre 2006 et 2008, le contenu technique de la Grande Muraille Verte s'est nourri des expériences passées en matière de ceintures vertes et de barrages verts (OSSF[2] ; CEN SAD, 2008). Les ceintures vertes sont des plantations d'arbres qui, placées autour des agglomérations et des infrastructures publiques spécifiques comme les routes, visent à les protéger de l'ensablement et de l'érosion. Les plus connues sont celles de Niamey, Nouakchott, Dakar et Ouagadougou en Afrique de l'Ouest, mais il en existe aussi autour de villages et de villes secondaires. Quant aux barrages verts, ils consistent principalement en des actions de reboisement de grande ampleur, comme en Algérie et en Chine.

Ceinture verte et barrage vert sont caractérisés par des activités de reboisement. Leurs objectifs sont de lutter contre l'ensablement, l'érosion et la déforestation ; ils sont aussi de promouvoir un développement local : les travaux de reboisement ouvrent des emplois locaux, généralement accompagnés d'activités génératrices de revenu comme le maraîchage ou l'agroforesterie.

La grande muraille verte se présente comme un réseau de petites ceintures vertes installées à titre curatif ou préventif en association avec les populations, et pouvant s'étendre selon les besoins et les moyens disponibles. La taille d'une ceinture verte est en principe fonction de la taille de l'ouvrage qu'elle est destinée à protéger (vocation de protection) et/ou de l'importance des besoins économiques, notamment en bois de feu, à couvrir (vocation de production). Sa mise en œuvre implique de recourir aux échelons décentralisés, dans un souci d'intégration à l'aménagement local des territoires.

Au plan stratégique, le concept s'insère dans les objectifs des trois conventions des Nations unies de lutte contre la désertification, d'atténuation des changements climatiques et de protection de la diversité biologique. Il s'insère

[2]Observatoire du Sahara et du Sahel.

également dans les plans stratégiques de réduction de la pauvreté et s'inscrit dans le mouvement en cours de décentralisation des ressources naturelles.

Dans ce contexte, l'Union africaine et la CEN SAD ont retenu le programme de Grande Muraille Verte au Sahara et au Sahel parmi leurs programmes prioritaires de long terme. Un plan d'action a été proposé en mai 2008. La commission de l'Union africaine et le Secrétariat de la CEN SAD, coordinateurs de l'initiative au niveau régional, ont commencé à définir les mécanismes institutionnels régionaux appropriés.

Contribution aux recommandations. Limiter autant que faire se peut les coûts de transaction dans la mise en œuvre d'initiatives régionales dont l'objet est un ensemble d'actions localisées. Éviter le gaspillage des ressources et leur mobilisation excessive pour la gestion institutionnelle, afin de réserver les moyens les plus importants à la réalisation des actions de terrain ainsi qu'aux actions de formation/sensibilisation à la gestion du risque sur le terrain. Se coordonner avec d'autres initiatives régionales poursuivant des objectifs semblables.

Encadré 6.1

Bangladesh

(Paul-Henri Bourrelier et Yves Le Bars, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles, AFPCN)

Une partie importante de la population de 130 millions d'habitants du Bangladesh vit sous la double menace des inondations saisonnières et de l'invasion de la mer lors d'événements météorologiques. Le pays a été dévasté en 1970 par un cyclone qui a fait un demi-million de morts, et en 1991 par un raz-de-marée qui a tué 138 000 personnes. Il se remet tout juste du passage en novembre 2007 du cyclone Sidr, qui a fait 3 300 morts, 800 disparus, 8,7 millions de sinistrés, et il vient d'être touché par le cyclone Aila. Ces catastrophes s'accompagnent de maladies et de disettes. L'élévation du niveau marin est de nature à aggraver de telles menaces dans la seconde moitié du siècle (Inman 2009).

Aidé par la communauté internationale, le Bangladesh a mis sur pied un très efficace système d'alerte anticyclonique et a construit de nombreux abris collectifs surélevés dans lesquels se réfugient les habitants et leur bétail sur ses plages. Ces mesures, associées à une efficacité croissante des secours, permettent de sauver à chaque fois des milliers de vies (*aussi* chapitre 2). L'émigration massive dans les pays voisins étant exclue, le pays fonde sa survie sur le durcissement de ce dispositif, l'amélioration de la résilience urbaine et industrielle, l'aménagement de son territoire (ouvrages de protection,

relocalisation dans les limites du possible). Le Bangladesh a constitué une Plateforme nationale de la réduction des désastres naturels qui développe des échanges avec les plateformes européennes.

L'intérêt des efforts déployés au Bangladesh dépasse de loin ses frontières dans la mesure où ce pays a pu être qualifié de « laboratoire pour les catastrophes naturelles ».

Inman M. (2009). Hot, flat, crowded – and preparing for the worst. *Science,* **326**: 662-663.

Références bibliographiques

Bollig M., Göbel B. Guest editors (1997). Risk and uncertainty in pastoral societies. *Nomadic peoples,* **1**: 190 p.

Bovin M. (2000). Pastoralists Manoeuvring in the Drought-Ridden Sahel. In Berner B., Trulsson P. (Eds). Manoeuvring in an environment of uncertainty. Structural change and social action in sub-saharian Africa. Ashgate.

LEAD/SIPSA (2005). Revue des systèmes d'information et systèmes d'alerte précoce au Sahel et problématique pastorale. Rapport technique.

Nations unies (1992). Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques. www.unfccc.int

OSS ; CEN SAD (2008). Initiative grande Muraille verte du Sahara et au Sahel, note introductive n°3, OSS, Tunis, 46 p.

Paavola J., Adger WN. (2006). Fair adaptation to climate change. *Ecological Economics,* **56**: 594-609.

Santilli M. *et al.* (2005). Tropical deforestation and the Kyoto protocol. *Climatic Change,* **71**: 267-276.

Sen A. (1992). *Repenser l'inégalité*, Paris, Seuil.

Union Africaine, CEN SAD (2008). *Plan of action for the implementation of the Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative.* 16th Executive Council of the CEN-SAD, Cotonou, Bénin, submitted, 20 p.

Walker G., King D. (2008). *The hot topic*. Bloomsbury publishing, London. 309 p.

Wisner B. *et al.* (2004). *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Second edition. London, Routledge.

Yohe G. (2007). An issue of equity. *Nature Reports Climate Change,* **5**: 71.

CHAPITRE 7

Sécurité publique

HENRI DÉCAMPS

La sécurité publique face aux événements climatiques extrêmes implique une vaste politique de formation et d'information. Elle suppose une association des opérationnels de terrain, des spécialistes des risques, des experts scientifiques et techniques, des gestionnaires de services publics et des réseaux collectifs. Elle suppose aussi des opérations de recherche et développement coordonnées au niveau international et surtout, une vision globale et partagée de la sécurité, incluant en très bonne place l'éducation et l'action humanitaire. L'objectif est d'acquérir une véritable aptitude à faire face de façon solidaire aux situations multirisques. Les encadrés attirent l'attention sur les nouveaux défis et responsabilités en ce domaine et sur l'expansion de l'univers des risques.

Les événements climatiques extrêmes peuvent bouleverser les sociétés humaines. Les travaux réalisés en archéologie et en paléoclimatologie ont révélé l'ampleur, parfois la soudaineté, de certains effondrements de ces sociétés en diverses régions de l'Ancien et du Nouveau Monde (Weiss et Bradley, 2001). Et l'histoire des sociétés antiques du Proche et du Moyen-Orient suggère l'idée de liens étroits entre bouleversements politiques et culturels et événements climatiques extrêmes (Kaniewski *et al.*, 2008 ; encadré 1.3 ; annexe 3).

Nos sociétés modernes ne sont pas moins exposées à des événements climatiques potentiellement destructeurs – et n'y sont pas moins vulnérables (O'Brien *et al.,* 2008). En prendre conscience ne va pas de soi, même si des images de désastres climatiques font régulièrement le tour du Monde. L'opinion publique sera toujours à convaincre de l'imminence de ces événements, et de la nécessité de tout mettre en œuvre pour les éviter ou tout au moins atténuer leurs effets. Car il est vrai qu'en ce domaine, « nous ne croyons pas ce que nous savons », comme « nous n'arrivons pas à nous représenter les implications de ce que nous savons » (Dupuy, 2005).

1 | Une approche systémique

La politique française de maîtrise des risques est basée sur la prévention, en particulier avec les démarches adoptées pour l'élaboration des Plans de prévention des risques (naturels PPRN et technologiques PPRT) et pour l'évaluation des aléas[1,2]. À cet égard, la défense civile de notre pays a bénéficié d'avancées en

[1] www.ineris.fr

[2] Le Service central de l'hydrométéorologie et de l'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), rattaché au service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), collabore avec Météo-France pour établir et diffuser, en coordination avec les 22 services de prévision des crues de l'Hexagone, une information de vigilance « crues ». Le SCHAPI assure également une mission d'appui auprès des services et des établissements intervenant dans les domaines de la prévision des crues, de l'hydrométrie et plus généralement de l'hydrologie.

matière d'alerte et de moyens de secours, qu'il s'agisse de santé, de météorologie, d'incendies, de crues... Des améliorations sont toutefois encore nécessaires pour informer les populations, les former, les alerter, de même que pour communiquer en situation d'urgence et de catastrophe[3]. C'est l'ensemble des plans de défense et de sécurité qu'il convient d'implémenter à tous les niveaux pour accroître les capacités de gestion de crise de l'État. Les encadrés 7.1 à 7.4 de ce chapitre font diversement écho à ces préoccupations.

On retiendra particulièrement la nécessité d'une approche systémique (HCFDC, 2008)[4], avec à la base : une doctrine de conduite des opérations, des équipements répondant concrètement aux besoins opérationnels, une organisation des ressources humaines, un soutien technique et opérationnel. Une telle approche implique une formation continue, un entrainement, des exercices. Son efficacité dépend de l'association : des opérationnels de terrain, des spécialistes des risques et menaces, des experts scientifiques et techniques, des gestionnaires de services publics et de réseaux collectifs. Des opérations de recherche et développement coordonnées internationalement doivent l'appuyer.

On retiendra aussi l'intérêt en ce domaine d'une vaste politique d'information, s'appuyant par exemple sur l'organisation de conférences régulières par le ministère de l'Intérieur et les préfectures, ainsi que par les responsables des grandes communautés territoriales et urbaines. Le développement de sites Internet publics sur les risques, les menaces et les comportements à tenir face aux dangers s'avère tout aussi indispensable[5], ainsi que la création d'un portail Internet global sur les risques, les menaces, les mesures de préparation et les conduites à tenir face aux accidents collectifs et aux catastrophes. Enfin, cette approche ne saurait être réalisée sans une clarification du vocabulaire pour préciser les concepts, ni sans une poursuite des efforts en matière de terminologie[6].

---

[3]Voir par exemple le récent rapport (Helias *et al.*, 2009) sur la mise en œuvre des programmes de prévention des inondations, regrettant notamment des actions de communication trop générales, non ciblées sur l'information préventive, et un régime d'assurance n'incitant pas au développement d'initiatives personnelles.

[4]Le Haut comité français pour la défense civile (HCFDC) est une plateforme d'échanges entre acteurs publics et privés sur les thématiques de sécurité globale, risques et menaces majeurs. Il promeut et diffuse des concepts et des techniques qui concourent à la protection des populations, organise des colloques et petits déjeuners, ainsi que des formations à tous les niveaux, des primo-intervenants aux décisionnaires.

[5]Tel le site www.autoprotectionducitoyen.eu développé en 2007 par le HCFDC, avec la Croix-Rouge française.

[6]Voir les travaux du Comité de terminologie et de néologie de l'Académie des sciences et de commissions telles que la Commission générale de terminologie et de néologie (CGTN) ou la Commission spécialisée de terminologie et de néologie en matière d'environnement (CSTN).

2 | Systèmes de communication

La gestion des catastrophes et des risques majeurs a été renouvelée par les systèmes de télécommunications. Il est désormais possible de collecter et de transmettre des données sur l'ensemble du globe. En France, l'ouverture de l'*Infrastructure nationale partagée des télécommunications* aux associations agréées de sécurité civile et opérateurs de services vitaux peut permettre un partage des télécommunications radio entre tous les acteurs du secours et de la sécurité en cas de catastrophe (HCFDC, 2008). À l'étranger, le Bangladesh, déjà pourvu d'un système d'alerte anticyclonique par radio et télévision, teste actuellement un système par envoi de SMS[7]. Aux États-Unis, Shneiderman et Preece (2009) préconisent le développement de réseaux, à l'image de Facebook, pour avertir des catastrophes, coordonner les réponses, disséminer l'information et secourir. De telles mises en réseau impliquant des particuliers pourraient compléter celles existant déjà entre professionnels en Amérique du Nord, en Europe ou en Asie.

L'utilisation des satellites dans la prévention des risques majeurs s'impose en matière d'observation, de télécommunications, de diffusion, de localisation et de collecte de données. Le nouveau modèle de prévision Arome de Météo-France s'appuie par exemple sur des observations satellitaires pour prévoir 3 à 30 heures à l'avance des phénomènes locaux tels que des orages, des tempêtes ou des nappes de brouillard. Ce modèle réalisé en partenariat avec le CNRS vise dans un avenir proche une finesse de maille de 1 km, voire de 500 m sur des zones particulièrement à risques[8]. Les techniques spatiales permettent aussi d'aider à prévoir des événements tels que les cyclones tropicaux, ou à prévenir, prévoir et gérer les inondations ; elles permettent de concevoir des aménagements et des équipements nouveaux à partir de retours d'expérience d'événements passés (Cnes, 2000). Mais il reste encore à s'adapter à ces techniques, à rénover et durcir les systèmes d'alerte, à en répartir le coût entre l'État et les collectivités, par exemple au travers d'un partenariat public privé (HCFDC, 2008).

Depuis 1999, une charte internationale « Espace et catastrophes majeures », créée à l'initiative du Centre national d'études spatiales (Cnes) et de l'Agence spatiale européenne, offre un système unifié d'acquisition et de livraison des données satellite en cas de catastrophes[9]. Cette charte regroupe une vingtaine

[7] Bien que parmi les plus pauvres du Monde, ce pays dispose d'un secteur des télécommunications en plein essor : sur 144 millions d'habitants, 44 millions possèdent un téléphone portable (*Les Échos*, 24 juin 2009).

[8] Mieux prévoir les orages (*Le Figaro*, 3 juin 2009).

[9] Depuis 2000, la procédure a été activée 217 fois avec une progression constante (*La Croix*, 16 juin 2009).

d'agences spatiales de pays de tous continents, pouvant être sollicitées par des organismes de secours nationaux ou internationaux, ainsi que par des ONG. Il reste encore à réduire le délai nécessaire à l'acquisition des données : le programme européen GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), renommé Kopernikus en 2008, vise à simplifier les mécanismes de diffusion des données spatiales, dans le cadre d'une coordination des efforts nationaux de recherche et de surveillance des zones à risques. Ce programme a pour objectif de doter les pays de l'Union européenne d'une capacité autonome de génération d'information environnementale, notamment dans le domaine de la composition chimique de l'atmosphère, de l'océanographie, de la gestion des situations d'urgence engendrées par des risques naturels, météorologiques ou technologiques.

Cette nécessaire coordination des acteurs civils à l'échelle européenne se double d'un renforcement de la coopération entre civils et militaires. Les besoins de la Sécurité civile sont en effet très proches des spécifications des systèmes militaires : mêmes contraintes opérationnelles en situations de crise, mêmes exigences de résolution forte, de rapidité d'accès par tout temps, de besoin de reprogrammation rapide.

3 | Faire face de façon solidaire

En évoquant dans les premiers chapitres de ce rapport les capacités de résilience des systèmes naturels, nous nous sommes interrogés sur la possibilité de s'inspirer de ces capacités pour résoudre nos propres problèmes de sécurité. Il semble approprié de terminer le présent chapitre sur la sécurité civile en remarquant avec Sagarin et Taylor (2008) que, de même que des myriades de solutions opérationnelles se sont développées individuellement en réponse à la variabilité des conditions environnementales, aucune solution unique du type *silver bullet* ne saurait s'appliquer aux problèmes de sécurité pour des sociétés aussi diverses et variables que celles dans lesquelles nous vivons.

Rappelons à cet égard, avec Walker et King (2008), l'exemple du Tsho Rolpa, lac du plateau tibétain situé à 4 500 mètres d'altitude. L'aire de ce lac est passée de 0, 23 km^2 en 1958 à 1,65 km^2 en 1997 sous l'effet d'une accélération de la fonte des glaciers de l'Himalaya. En quelques années, une centaine de millions de m^3 d'eau s'est ainsi accumulée, exerçant une pression croissante sur un barrage de moraine par nature fragile, certitude de catastrophe pour les villages de toute une vallée. Cette certitude a décidé les autorités népalaises : 1) à percer un canal dans la moraine et à installer une vanne de contrôle du niveau du lac pour l'évacuation des eaux ; 2) à établir un système d'alarme pour les 19 villages de l'aval ; 3) à convaincre les villageois de participer, concevoir

et organiser des exercices d'entrainement aux alertes. Cette vigilance collective n'a été possible que par un partage du savoir et des conséquences de ce savoir.

Ce partage est essentiel pour que, face à la rapidité et à l'ampleur des événements extrêmes, les citoyens puissent compter sur eux-mêmes dans le cadre d'une mise en réseau des différents piliers administratifs, économiques et citoyens du pays (HCFDC, 2008) ; dans le cadre aussi d'une diffusion de l'information nécessaire aux réflexes conservatoires, tant en ce qui concerne les incendies de forêt, les tempêtes, les inondations que, plus généralement, les crises complexes évoquées dans l'encadré 7.1.

Encadré 7.1

Changement climatique, événements extrêmes, méga-crises : nouveaux défis, nouvelles responsabilités

(Patrick Lagadec, Laboratoire d'économétrie de l'École polytechnique)

Émergences de maladies infectieuses, désastres naturels. . . Les sociétés complexes sont aujourd'hui confrontées à des crises climatiques de classe nouvelle : les chocs événementiels sortent brutalement des registres de référence et les socles les plus essentiels à nos sociétés connaissent des processus de liquéfaction de plus en plus déroutants. La mise en résonance des deux phénomènes engendre des effets de sape foudroyants. Nous sommes de plus en plus confrontés à des chocs « hors cadres », caractérisés par :

L'ampleur des phénomènes, Katrina dévastant par exemple une superficie grande comme celle de la Grande-Bretagne ;

La globalité, tout point de la planète pouvant se trouver confronté à une crise importée, d'origine lointaine, dans l'espace comme dans le temps ;

Le réseau, les enchevêtrements des infrastructures vitales (énergie, communications, eau, transports, systèmes financiers, etc.), dont nous sommes de plus en plus dépendants, pouvant donner à tout dysfonctionnement une puissance de déstructuration inédite ;

L'ignorance, l'expert n'arrivant plus à cerner la menace, à donner des pronostics, n'arrivant plus à savoir même s'il y a problème ou non ;

L'hyper-complexité, un cyclone sur la Nouvelle-Orléans s'accompagnant d'une inondation majeure et persistante, de catastrophes industrielles en série, de principes d'évacuation dépassés, de pollutions létales de grande ampleur, de la destruction à 90 % des réseaux vitaux, de problématiques de sécurité publique inédites ;

L'inconcevable, qui marque fondamentalement les chocs et turbulences chaotiques actuelles, qu'il s'agisse de vagues de chaleur, de cyclones, de sécheresses, de pandémies, de déstructurations sociétales, avec des combinaisons les plus surprenantes entre de multiples lignes de fracture ;

Un médiatique de « classe 5 », Internet apportant l'instantanéité, la connectivité et la mise en résonance mondiale de toutes les rumeurs.

Nous sommes les héritiers d'un monde où le risque était surtout lié à telle installation dangereuse, dont il fallait « maîtriser le risque ». Nous voici aux prises avec des fragilités qui tiennent aux architectures, aux textures fondamentales. Témoins de ces vulnérabilités exacerbées, les « chaînes d'approvisionnement » qui fonctionnent selon un principe de flux tendu poussé à l'extrême – avec, par exemple, des stocks de nourriture dans les grands centres commerciaux qui ne dépassent guère la demi-journée. Cette interdépendance générale se retrouve, des centres serveurs financiers et bancaires aux télécoms, aux systèmes de contrôle (aériens par exemple), aux réseaux de distribution d'énergie.

De telles vulnérabilités nous obligent à réajuster nos visions et nos outils, plaçant la discontinuité au cœur de nos explorations. Elles obligent les plus hauts niveaux de toute institution à prendre en charge l'anticipation des risques et le pilotage des situations à haut degré de surprise, à disposer de forces de réflexion rapide aptes à se mettre en réflexion ouverte et en réseaux aux premiers signaux de crise non conventionnelle.

En fait, les chocs qui iront de pair avec les nouveaux risques exigent des modes de fonctionnement qui ne peuvent plus reposer sur notre vision d'un État apportant les solutions à des groupes humains inertes ou anesthésiés à coup de « communication de crise ». Les progrès passent par des actions précises d'apprentissage, d'expérimentation, de retours d'expérience. Ils passent aussi par une formation qui permette aux futurs responsables et citoyens de trouver vision, équilibre, compétence et écoute, dans un monde traversé de crises et de ruptures.

Nous devons acquérir les aptitudes qu'appellent les nouveaux défis du XXIe siècle, tant en matière de connaissance que d'action. Et nous devons prendre conscience de nos ressources – d'abord en détermination personnelle et collective.

Beroux P., Guilhoux X., Lagadec P. (2008). Rapid Reflection Forces put to the reality test. *Crisis Response*, **4**: 38-40.

Lagadec P. (2007). Over the edge of the world. *Crisis Response*, **3**: 48-49.

Il faut donc une vision globale et partagée de la sécurité, incluant en très bonne place l'éducation et l'action humanitaire qui suit les crises et permet le retour à la vie. La préparation aux situations de crise a fait l'objet d'importants travaux ministériels et interministériels et les systèmes français de vigilance ont pour leur part de grands mérites, qu'il s'agisse des systèmes d'alerte de Météo-France ou des systèmes de veille sanitaire, pouvant placer notre pays en pointe dans le domaine de l'« *early warning* » – un sujet de coopération croissante à l'échelle internationale.

Cependant, il s'avère indispensable d'intensifier les échanges entre les composantes de la société pour accentuer sa cohésion et réduire le cloisonnement des efforts et des institutions, acquérir une véritable aptitude à faire face de façon solidaire aux situations multirisques. Le même impératif vaut au niveau international, à commencer par le niveau européen.

En fait, toute vision globale pose la question de la bonne échelle géographique d'appréhension des risques, ne serait-ce que pour créer des entités organisationnelles, à l'exemple des syndicats de bassin versant pour la lutte contre les inondations. Cette échelle géographique d'appréhension des risques est essentielle pour interpréter comme il se doit les derniers résultats publiés en matière d'extrêmes (Allison *et al.*, 2009), soulignant que : 1) les températures extrêmes élevées continuent à augmenter et les températures extrêmes basses à diminuer ; 2) les épisodes tant de fortes précipitations que de sécheresses devraient s'accroître dans l'avenir.

Encadré 7.2

Un univers des risques en expansion

(Denis Kessler, Groupe SCOR)

Il peut paraître paradoxal d'affirmer que l'univers des risques est en expansion alors que nous anticipons un allongement de la durée de vie moyenne mais aussi maximale. N'est-ce pas la preuve que nous vivons dans un monde moins risqué ? C'est oublier que l'acquis présent n'a été obtenu qu'au prix d'une lutte acharnée contre les risques et que chaque avancée de l'humanité découvre de nouveaux risques insoupçonnés contre lesquels il faut à chaque fois se remobiliser sous peine de perdre le terrain gagné précédemment.

D'abord, l'univers des risques est en croissance. Les hommes se sont toujours implantés dans des zones risquées, au pied des volcans, dans le lit des rivières ou dans le couloir des ouragans, où la terre est plus riche et le climat plus clément. Mais, avec la croissance de la population, ces concentrations dans les zones les plus risquées de la surface de la Terre ne fait que s'accentuer. Parallèlement, l'enrichissement économique fait que les pertes

potentielles susceptibles d'être subies par ces populations augmentent. À côté de ces risques qui changent de taille, de nouveaux risques apparaissent, auxquels la multiplication des échanges et l'accroissement des concentrations humaines peuvent donner une dimension rapidement dramatique. Ce sont les risques de pandémie, comme le Sida, ou les formes aigües de grippe. Ce sont aussi les risques liés au développement des réseaux, comme Internet, ou aux innovations mal contrôlées, parmi lesquelles il faut compter non seulement les innovations biologiques, chimiques ou technologiques mais aussi les innovations financières. L'intervention du juge est elle-même devenue une source croissante d'insécurité. La jurisprudence a ainsi eu tendance à étendre le champ de la responsabilité civile pour les dommages causés à autrui par action ou par omission et à imposer des contraintes supplémentaires aux personnes, dans des conditions difficilement prévisibles par celles-ci.

Mais l'univers des risques n'est pas seulement en croissance, il est aussi en mutation. Les risques deviennent de plus en plus complexes, soit que leur évolution se fasse plus endogène et progressive, comme les risques de santé ou de perte d'autonomie chez les personnes âgées, soit qu'ils se révèlent plus interdépendants, comme les risques financiers et économiques qui jouent un rôle grandissant dans nos sociétés enrichies. Les risques, et cela inquiète plus que tout, semblent devenir de moins en moins contrôlables. Ainsi apparaissent des risques aux conséquences beaucoup plus durables pouvant s'étaler sur des centaines d'année, voire irréversibles, comme c'est le cas du risque nucléaire et, encore plus, des risques climatiques liés au réchauffement de la planète. Plus inquiétant encore, les risques se font plus insidieux et moins visibles, donc plus difficiles à combattre, comme le terrorisme ou les virus informatiques nous en fournissent l'exemple. Le fait que les risques extrêmes résultent plus de la recorrélation d'événements indépendants en temps normal rend leur prévision et donc leur maîtrise extrêmement difficiles : ils ne suivent pas une loi de distribution normale et sont affectés d'un degré d'ambiguïté élevé, au sens où ils ne renvoient jamais de façon univoque à une loi de distribution connue et unique.

Comme l'ont montré l'ouragan de la Nouvelle-Orléans, la psychologie peut modifier et amplifier la nature du risque. Ayant le sentiment d'avoir plus à perdre, car étant plus riches, face à un monde qu'ils perçoivent comme moins maîtrisé et plus inquiétant, nos contemporains ont développé une aversion accrue au risque et un sentiment croissant de vulnérabilité. Ce sentiment de vulnérabilité conduit à une demande accrue de protections que la crise de l'État providence incite à rechercher sur le marché. De fait, le marché et non la puissance publique offre aujourd'hui aux agents économiques l'essentiel des protections contre les risques extrêmes, qu'ils soient naturels ou imputables à l'homme.

Encadré 7.3

Risque cyclonique : Antilles françaises et pays de la Caraïbe (Constantin Pontikis, Université des Antilles et de la Guyane)

Aux Antilles françaises, les mesures à prendre en cas de crise cyclonique sont fixées par la loi du 13 août 2004 de modernisation de la Sécurité civile. Cette loi implique de connaître suffisamment les risques, de les prévoir et de s'y préparer, mais aussi d'organiser les réponses aux événements.

Dans ce cadre, le maire a la responsabilité des secours de proximité, le représentant de l'État celle des sinistres de grande ampleur. Si le maire a en effet une vision des enjeux et des vulnérabilités de sa commune, une appréciation plus globale du territoire régional, dans lequel s'insère son domaine de responsabilité, est aussi nécessaire. C'est en effet à cette échelle régionale que pourront être visualisés les aléas du risque cyclonique (vitesses de vent attendues, précipitations, etc.). Dans les conditions actuelles, la réglementation relative à la gestion de la crise cyclonique existe. Il suffit de veiller à sa stricte application tout en améliorant les faiblesses révélées par les retours d'expérience. Par ailleurs, les Antilles françaises évoluent dans le cadre régional de l'archipel caraïbe qui comporte une majorité de petites îles-États, dans lesquelles s'applique une logique assez semblable de structuration des organismes chargés de la gestion des crises cycloniques.

La procédure dite de « vigilance météorologique » est en vigueur aux Antilles françaises, depuis 2006, tant pour les dangers induits par les perturbations cycloniques tropicales que pour les phénomènes météorologiques courants. L'utilisation de codes de couleurs, désormais associés aux dangers cycloniques, facilite l'interprétation des informations par la société civile. Quelles que soient les incertitudes, l'éventualité d'une croissance du nombre de situations de crise cyclonique liées au réchauffement climatique doit être prise en compte (AFPCN, 2007). Les mesures de sécurité et les modes de sensibilisation des populations devront intégrer la probabilité de crises consécutives, séparées par des laps de temps courts, où la fin d'une période de crise se confond avec le début d'une nouvelle. Cela oblige à réviser les modes d'engagement des ressources humaines disponibles, les modes d'utilisation et d'entretien des moyens d'intervention et de secours, et les méthodes d'information des populations concernées en vue de les préparer à des situations de confinement prolongées (UAG, 2008).

Contribution aux recommandations. 1) créer une banque de données (accès libre) contenant les informations relatives à l'évolution des enjeux, mise à jour et documentée de manière continue par les services appropriés (État, région, communes) ; 2) promouvoir des politiques d'incitation pour déplacer,

sur une base de volontariat, les personnes installées sur les zones à risque cyclonique accru vers des régions moins soumises à cet aléa.

AFPCN, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles (2007). *Les Ouragans de l'Atlantique Nord et le Réchauffement Climatique : Exemple de la Caraïbe.* Colloque Université des Antilles et de la Guyane http://lpat-geol.univ-ag.fr/serveur/colloque/colloque.html

UAG, Université des Antilles et de la Guyane (2008). *Prévision des trajectoires, de l'évolution du potentiel dynamique et de l'impact des ouragans à l'échelle des îles de la Caraïbe*. Projet Régional Interreg III B « espace Caraïbes ».

Encadré 7.4

Vers une approche internationale et européenne

(Roland Nussbaum)
Mission des sociétés d'assurance pour la connaissance et la prévention des risques naturels.

Des cadres d'action internationale de plus en plus convergents…

Suite à la Décennie internationale pour la prévention des catastrophes naturelles et au Programme de Yokohama, consécutif au tremblement de terre de Kobe (1995), la coopération internationale pour la prévention des catastrophes naturelles (Disaster Risk Reduction, DRR) s'est intensifiée avec le programme d'action de Hyogo (2005-2015), adopté par les Nations unies, dans la vague de l'émotion suscitée par les conséquences du tsunami de fin 2004.

La stratégie internationale pour la réduction des catastrophes (UN-ISDR) s'articule désormais avec plusieurs conventions, accords et programmes internationaux, de portée transversale (droits humains, développement durable, objectifs du millénaire, adaptation au changement climatique) ou spécialisée (patrimoine naturel et culturel, cours d'eau transfrontaliers et autres domaines de l'environnement), qui l'ont, dès le départ ou progressivement, intégrée.

… conjugués à un faisceau croissant de politiques européennes

La convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement

(1998) a ouvert la voie aux formes récentes de gouvernance dans la prévention des risques catastrophiques.

La directive pour l'évaluation et la gestion des inondations (2007/60/CE) invite les États membres à une gestion plus équitable et durable des risques, prenant en compte des hypothèses de changement climatique, des scénarios d'occurrence et l'analyse coûts-bénéfices pour favoriser prise de décision, planification et évaluation.

Le livre blanc (COM(2009) 147) pour une stratégie d'adaptation au changement climatique retient d'initialiser l'action sur 3 ans, se concentrant sur : les connaissances, l'intégration de l'adaptation dans les autres politiques communautaires clés, le déploiement d'une combinaison d'instruments d'accompagnement (instruments de marché, *guidelines*, partenariats public privé), la coopération internationale. La communication (COM(2009) 39) pour la préparation d'un accord global en matière de changement climatique à Copenhague reflète ces orientations ; la communication (COM(2009) 82) pour une approche communautaire de la prévention des catastrophes naturelles ou d'origine humaine les étend à l'ensemble des risques majeurs, retenant notamment l'amélioration de l'efficacité des instruments existants, tels que ciblage des financements et prise en compte de la prévention dans la législation actuelle. Dans sa stratégie pour le soutien à la réduction des catastrophes dans les pays en développement (COM(2009) 84), l'Union européenne endosse le cadre d'action de Hyogo.

Changements de paradigmes

Des programmes cadres de la Commission européenne[10] au programme pour une recherche intégrée sur les risques catastrophiques[11] de l'ICSU (IRDR, 2008), en passant par nombre d'autres programmes internationaux (GEO, GMES, etc.), le nouveau mot clé de « résilience sociétale » invite à changer de paradigmes : approches multirisques, vulnérabilités systémiques, jeu des acteurs, culture et conscience du risque, intégration des contextes juridico-économiques. Au bénéfice de l'excellence dans la production de connaissance. . .

[10] http://www.preventionweb.net/english/professional/trainings-events/events/v.php?id=10785

[11] http://www.icsu.org/Gestion/img/ICSU_DOC_DOWNLOAD/2121_DD_FILE_Hazard_report.pdf

Références bibliographiques

Allison I. *et al.* (2009). *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate Science*. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60 p. www.copenhagendiagnosis.com

CNES (2000). *L'apport de l'espace dans la gestion des risques naturels : un début de réponse*. Dossier 41 pp. http://www.cls.fr

HCFDC (Haut Comité Français pour la Défense Civile) (2008). *Constats et propositions pour une vision globale de la sécurité*. Rapport Défense Civile, Paris. www.hcfdc.org

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S. *et al.* (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Dupuy JP. (2005). *Petite métaphysique des tsunamis*. Le Seuil. Paris.

Helias A. *et al.* (2009). *Premiers enseignements tirés de la mise en œuvre des programmes d'action de prévention des inondations (PAPI).* Rapport n^{circ} 006319-01 du Conseil Général de l'Environnement et du Développement durable. www.developpement-durable.gouv.fr

Kaniewski D. *et al.* (2008). Middle East coastal ecosystem response to middle-to-late Holocene abrupt climate changes. *PNAS*, **105**: 13941-13946.

O'Brien K. *et al.* (2008). *Disaster Risk Reduction, Climate Change Adaptation and Human Security.* Report prepared for the Royal Norwegian Ministry of Foreign Affairs by the Global Environmental Change and Human Security (GECHS) Project, GECHS Report 2008:3.

Sagarin RD., Taylor T. (Eds.) (2008). *Natural Security: a Darwinian approach to a dangerous world*. University of California Press, Berkeley.

Shneiderman B., Preece J. (2009). 911 gov. *Science,* **315**: 944.

Walker G., King D. (2008). *The hot topic: how to tackle global warming and still keep the lights on.* Bloomsbury, London.

Weiss H., Bradley RS. (2001). What drives societal collapse ? *Science*, **291**: 609-610.

CONCLUSION

Les systèmes vivants ont toujours été confrontés à des événements climatiques extrêmes. Cette situation se poursuivra forcément dans l'avenir : les séries d'événements climatiques comprendront toujours des extrêmes, rares par rapport aux événements typiques de la série. La question de fond est que ces extrêmes risquent de devenir plus dangereux, d'une part parce que plus intenses, d'autre part parce que frappant des régions qui continueront à être affectées par le surpeuplement, les pollutions, le changement climatique en cours...

Cette plus grande dangerosité renvoie à deux notions essentielles, celles de dérive et de surprise. Dérive, parce qu'un événement extrême tel que la vague de chaleur de 2003 en Europe sera devenu la norme en 2050 : les socio-écosystèmes auront peut-être pu s'y adapter mais ils seront alors confrontés à des extrêmes plus intenses que les actuels. Surprise, parce les événements extrêmes sont beaucoup moins prévisibles que les événements plus fréquents, notamment avec des bifurcations inattendues prenant en défaut les mécanismes d'adaptation.

À l'échelle mondiale, les événements climatiques extrêmes continueront à nous surprendre par leur ampleur, leur globalité, leur complexité, leurs enchevêtrements. Ils nous surprendront d'autant plus que nous maîtriserons mal leurs effets de par l'entassement des populations dans des zones à risque, l'absence d'espaces libres pour des émigrations massives, l'épuisement de certaines ressources, la dégradation des écosystèmes et l'érosion de la biodiversité.

La France, territoires et départements d'outre-mer compris, n'est pas moins vulnérable que d'autres pays. Cette vulnérabilité tient au morcellement administratif du territoire, à la faible coopération des opérateurs de service public, à

l'insuffisance de débat public, au recours persistant à l'État, à de mauvaises couvertures financières. Elle tient aussi, comme ailleurs, aux concentrations urbaines dans des zones à risque et à des normes de construction inadaptées.

Deux causes majeures de vulnérabilité méritent encore d'être soulignées : la dispersion des systèmes de vigilance et la dégradation des services écologiques. Souligner la dispersion des systèmes de vigilance n'est pas nier l'existence des dispositifs avancés mis en place dans les domaines de la météorologie et de la santé. C'est plutôt promouvoir leur généralisation dans le cadre d'un système d'alerte multirisque prenant en compte quatre aspects essentiels d'une préparation efficace aux événements climatiques extrêmes : la prévision, la prévention, l'action de secours dans l'urgence et la restauration. Souligner la dégradation des services écologiques n'a rien à voir avec une vision fixiste de la dynamique des milieux naturels. C'est, tout en sachant que les assemblages d'espèces et les écosystèmes changent en permanence dans l'espace et dans le temps, reconnaître le caractère non souhaitable de certains de ces changements du point de vue de la viabilité des socio-écosystèmes actuels.

Enfin, cette vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes pose un défi permanent à l'état de nos connaissances sur ces événements et leur impact sur les systèmes écologique et sociaux. Quels sont les mécanismes d'adaptation et de résilience de ces systèmes ? Quelles régulations des effets des événements climatiques extrêmes peut-on attendre des systèmes écologiques ? Comment évolueront les dynamiques du cycle hydrologique aux différentes échelles locales, régionales, continentales ? Quels principes appropriés concevoir pour l'aménagement des territoires, l'urbanisation, les constructions ? Comment améliorer la vigilance, l'alerte, les mesures immédiates de crise, les outils de suivi en temps réel, le financement des préventions des impacts liés aux événements extrêmes à venir ? Autant de thèmes pour des programmes fédérateurs de recherche d'excellence, à organiser en prenant en compte les situations de grande incertitude dans lesquelles nous plongent les événements extrêmes.

Cette prise en compte concerne de nombreux mécanismes, par exemple ceux du fonctionnement des communautés végétales en réponse à des événements climatiques extrêmes (Peylin et Ciais, chapitre 1 – encadré 1.2 et annexe 2). L'analyse de cette réponse exige des suivis sur le long terme, à l'aide de tours à flux, de mesures du CO_2 atmosphérique, de données de télédétection spatiale, d'inventaires de biomasse. Elle exige aussi de développer la validation et les performances d'outils de simulation numérique aux diverses échelles, locales à globales, dans le but de comprendre les mécanismes conduisant aux événements extrêmes, ainsi qu'aux échanges des flux de gaz carbonique, d'eau et d'énergie entre écosystèmes et atmosphère pendant, et après, ces événements. Elle oblige enfin à intégrer ces connaissances physiques et biogéochimiques dans les modèles de prévision du climat futur, afin de mettre en évidence les effets en retour

de la végétation – des modèles qui doivent recourir à des méthodes mathématiques appropriées aux situations de grande incertitude et de bifurcation.

Ces programmes fédérateurs d'excellence ne peuvent se passer d'une intégration des sciences de l'homme et de la société dès la phase initiale de leur conception. Des progrès notables en ce sens méritent d'être soulignés. Lors de la conférence sur le climat, réunie à Copenhague en mars 2009, près de la moitié des exposés sont venus de spécialistes de disciplines telles que la géographie, la philosophie, les sciences politiques, l'anthropologie, l'économie, la sociologie et l'histoire[1]. Ces exposés ont apporté un éclairage particulièrement utile sur des domaines clés de la préparation aux événements climatiques extrêmes, précisément en matière de gouvernance, d'adaptation, de communication, de comportement, de résilience, de culture... amenant à l'idée qu'il est possible d'atténuer les effets des événements climatiques extrêmes par des actions de prévision, de prévention, d'interventions et de restauration, à une condition toutefois, essentielle – celle d'un développement juste et équitable de tous les peuples de la planète.

Note finale. L'inondation due à la tempête Xynthia est survenue alors que ce rapport était en cours d'impression. Comme souvent, cette tragédie a créé un admirable élan d'entraide et de solidarité. Elle a témoigné de l'efficacité des professionnels de la météorologie, du dévouement et de la générosité de ceux de la sécurité civile. Mais elle a encore une fois révélé notre incapacité chronique à anticiper de tels événements dans toute leur complexité. Pourtant, les risques d'inondations sont connus ; ils ont fait l'objet de textes législatifs et réglementaires... Commençons donc par appliquer ces textes. En même temps, inventons de nouvelles gouvernances, de nouvelles logiques d'aménagement des territoires, cultivons les bons réflexes. Réduire nos vulnérabilités aux événements climatiques extrêmes à venir exige de la constance, de la persévérance, de la ténacité... L'oubli est ici notre pire ennemi !

[1] Hulme M. *et al*. (2009). Conference covered climate from all angles. *Science* **324** : 881-882.

REMERCIEMENTS

Les membres du groupe de travail et les auteurs remercient vivement celles et ceux qui ont contribué à améliorer des versions antérieures de ce rapport, particulièrement : au comité RST de l'Académie des sciences, au groupe de lecture critique, au conseil scientifique de l'Association française pour la protection des catastrophes naturelles (AFPCN) ainsi que, à titre individuel, Paul Leadley et Robert J. Naiman, respectivement professeurs aux Universités de Paris-Sud et de l'État Washington.

Erwann Michel-Kerjan, professeur à l'Université de Pennsylvanie, auteur de l'un des chapitres « Économie » de ce rapport, a collaboré étroitement avec l'animateur en apportant son éclairage sur divers éléments du rapport.

ANNEXES

1. Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme (Agnès Ducharne *et al.*).

2. Impact des extrêmes climatiques sur la végétation : l'année 2003, un test en vraie grandeur pour l'Europe (Philippe Peylin et Philippe Ciais).

3. Événements climatiques extrêmes et chaos social dans les sociétés antiques de Méditerranée orientale (David Kaniewski et Élise Van Campo).

4. Table des matières du numéro thématique « Écosystèmes et événements climatiques extrêmes », *C.R. Geoscience*, 2008, tome 340, n° 9-10.

ANNEXE 1

Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme (Projet RExHySS)

AGNÈS DUCHARNE[1] ET L'ÉQUIPE RExHySS[2]

[1] Coordinatrice du projet ; UMR Sisyphe, UPMC/CNRS ; Contact : A. Ducharne@upmc.fr

[2] Boé J., Bourqui M., Crespi O., Déqué M., Evaux L., Gascoin S., Habets F., Hachour A., Leblois E., Ledoux E., Lepelletier T., Maisonnave E., Martin E., Moulin L., Oudin L., Pagé C., Perrier A., Ribstein P., Rieu J., Sauquet E., Terray L., Thiéry D., Viennot P.

Ce projet de modélisation soutenu par le programme GICC du MEEDDAT est ciblé sur les bassins versants de la Seine et de la Somme, tous deux soumis à un climat océanique et dont les débits sont significativement influencés par les nappes souterraines.

Le principe général d'une étude d'impact hydrologique du changement climatique est d'utiliser les conditions climatiques du futur simulées par un modèle de climat global en fonction d'un scénario d'émission en gaz à effet de serre pour le XXIe siècle. Il s'agit alors de transformer ces estimations climatiques (en particulier températures et précipitations) en grandeurs caractéristiques du fonctionnement hydrologique des bassins versants étudiés (débits et niveaux des nappes phréatiques). On utilise pour cela des modèles hydrologiques de bassin, qui sont d'abord calés sur les conditions actuelles, puis utilisés pour simuler le fonctionnement du bassin sous différents scénarios climatiques.

Une étape préliminaire importante est celle de la régionalisation des scénarios climatiques. On parle aussi de désagrégation ou de descente d'échelle. Il s'agit d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle, tout en corrigeant les distributions spatio-temporelles des défauts statistiques les plus pénalisants pour la simulation hydrologique. Les méthodes sont nombreuses mais reposent toutes sur une phase d'apprentissage en temps présent, afin que le climat récent simulé ressemble après régionalisation au climat récent observé à petite échelle. Nous utilisons ici les méthodes quantile-quantile (Déqué, 2007) et des régimes de temps (Boé *et al.,* 2006), développées récemment par la communauté française pour rendre compte des changements de variabilité du climat, de l'échelle journalière à interannuelle, en plus du changement de climat moyen. Elles permettent donc d'aborder l'impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques (crues, étiages) en plus des ressources en eau.

Pour appréhender les incertitudes liées à la modélisation du climat, nous avons classiquement multiplié les scénarios de changement climatique. Nous avons ainsi produit 12 scénarios régionalisés, caractérisés par différents modèles climatiques et scénarios d'émissions utilisés pour les simulations du GIEC, et différentes méthodes de régionalisation. Ces 12 scénarios régionalisés ont servi à simuler débits et niveaux des nappes par 6 modèles hydrologiques, afin de pouvoir également analyser les incertitudes liées à ces modèles, qui couvrent les principales différences entre les grandes écoles de modélisation hydrologique (hydrométéorologiques *vs* hydrogéologiques, distribués *vs* globaux[3], à

[3]Pour les hydrologues français, un modèle global simule un bassin versant dans sa globalité, sans en décrire les hétérogénéités internes, ce qui correspond au sens français de global. Ce terme se traduit par « *lumped* » en anglais, et la confusion ne doit pas être faite avec l'anglicisme courant qui utilise global pour planétaire.

bases physiques *vs* conceptuels) et ont tous été testés en temps présent avec de bonnes performances.

Une question de fond concerne la validité des climats et des débits ainsi simulés. Elle ne peut être testée que par référence aux observations passées. Nous avons donc comparé le climat récent simulé par le modèle climatique ARPEGE, puis régionalisé par les deux nouvelles méthodes utilisées, avec le climat observé, tel qu'analysé dans la base de données SAFRAN de Météo-France (Quintana-Sequi *et al.,* 2008). Les analyses préliminaires montrent des biais faibles et des distributions des valeurs journalières réalistes. Les écarts entre les débits simulés à partir de ces scénarios régionalisés et à partir des forçages SAFRAN sont plus importants, mais ils restent acceptables, pour l'ensemble des modèles hydrologiques disponibles.

Les différents scénarios de changement climatiques que nous avons régionalisés selon ces méthodes s'accordent sur un réchauffement au cours du XXIe siècle, qui s'accompagne d'une baisse importante des précipitations estivales. Si le signe d'évolution des précipitations hivernal n'est pas certain, les cumuls annuels baissent d'ici à 2100, de 11 % en moyenne sur l'ensemble des scénarios considérés.

Ces changements climatiques régionaux entraînent un assèchement prononcé des bassins étudiés au cours du XXIe siècle, selon l'ensemble des modèles hydrologiques. Cet assèchement se traduit par une baisse des nappes phréatiques, qui contribue à la baisse les débits. Nos analyses indiquent ainsi une baisse de 150 m^3/s du débit moyen de la Seine à son exutoire (Poses) entre le temps présent et l'horizon 2100, soit 28 % du débit moyen actuel. Les incertitudes autour de cette valeur sont d'environ 50 m^3/s, et proviennent d'abord des modèles climatiques, puis des modèles hydrologiques. Cette baisse relative du débit est assez uniforme à l'échelle saisonnière, et se répercute donc sur les hautes et les basses eaux. La réponse des valeurs extrêmes des débits est un peu plus contrastée, puisque les débits des étiages les plus sévères[4] baisseraient fortement, alors que les pointes de crue les plus rares[5] ne changeraient pas significativement. À cette exception près, tous les changements ci-dessus, qu'ils concernent le climat régional ou ses conséquences hydrologiques, sont robustes face aux incertitudes analysées.

Nous avons aussi étudié les conséquences du changement climatiques sur l'irrigation des cultures. Les besoins en irrigation et leurs conséquences sur les débits et les niveaux des nappes peuvent être simulés dans le bassin de la Seine

[4]Débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être sous-passé, et noté QMNA5).

[5]Débit journalier maximal annuel de fréquence décennale (ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être surpassé, et noté QJXA10).

grâce au modèle couplé STICS/MODCOU. Nous avons pu montrer que le modèle agronomique STICS simule des doses d'irrigation assez réalistes dans les régions irriguées, mais qu'il est insuffisant pour prédire les zones effectivement irriguées, qui ne couvrent actuellement que 2,7 % de la surface agricole utile. Les irrigations potentielles simulées par STICS sous changement climatique ne peuvent donc pas être utilisées comme une image de l'irrigation future.

L'augmentation relative des doses potentielles d'irrigation simulées par STICS – de 50 à 60 % selon les deux scénarios de changement climatique examinés – peut néanmoins être utilisée pour modifier l'irrigation actuelle, sous l'hypothèse que les systèmes de cultures restent inchangés. La question qui se pose alors est de savoir si cette demande en eau accrue pour l'irrigation reste compatible avec les autres usages de l'eau. En d'autres termes, une augmentation des débits prélevés en nappe à des fins d'irrigation (passant éventuellement par la création de nouveaux forages) ne risque-t-elle pas de déprimer les formations aquifères et de limiter ainsi le débit de base des rivières ?

De fait, ces besoins supplémentaires pour l'irrigation s'ajouteront aux importants déficits d'alimentation des nappes aquifères calculés sous changement climatique, et qui expliquent la baisse des niveaux des nappes indiquée précédemment. Les déficits calculés par le modèle hydrodynamique MODCOU dans le bassin de la Seine baissent de 1/3 en moyenne entre le temps présent et l'horizon 2100, ce qui correspond à un déficit d'alimentation supérieur à 2500 Mm^3/an, et approche les volumes actuellement prélevés tous usages confondus[6]. Au vu des premiers résultats acquis sur la Beauce, où l'irrigation est la plus intense, nous pouvons d'ores et déjà nous demander si l'irrigation des grandes cultures restera viable au regard des autres usages de l'eau sur le bassin.

La sévérité des impacts simulés résulte de la conjonction du réchauffement et de la baisse des précipitations annuelles. Celle-ci constitue un changement notable par rapport à d'autres analyses (par exemple, Ducharne *et al.*, 2007 ; Dankers et Feyen, 2008) postulant une stabilité des cumuls annuels de précipitation sous changement climatique, dans cette zone de transition entre l'Europe du Nord, où les précipitations annuelles devraient augmenter, et celles du Sud, où elles devraient diminuer. L'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique, mais la baisse des précipitations annuelles que nous anticipons dans les bassins de la Seine et de la Somme représente la meilleure projection actuellement disponible, car convergente pour de nombreux scénarios de changement climatique correspondant

[6]Prélèvements globaux de 3025 Mm^3 dans le bassin de la Seine en 2001 pour les usages domestiques, industriels et agricoles, dont 60 % en eaux de surface et 40 % en eaux souterraines (source : Agence de l'Eau Seine-Normandie).

à l'état de l'art (IPCC, 2007), et pour deux méthodes de régionalisation totalement différentes mais validées en climat récent sur le domaine.

Références bibliographiques

Boé J. *et al.* (2006). A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J Geophys Res*, **111**, D23106.

Dankers R., Feyen L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *J Geophys Res*, **113**, D19105.

Déqué M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**: 16-26.

Ducharne A. *et al.* (2007). Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, **375**: 292-311.

IPCC, Working Group I (2007). *Climate change 2007: the physical science basis*. 4th assessment report, Genève.

Quintana-Seguí P. *et al.* (2008). The SAFRAN atmospheric analysis: Description and validation. *J Applied Meteorology and Climatology*, **47**: 92-107.

ANNEXE 2

Impact des extrêmes climatiques sur la végétation : l'année 2003, un test en vraie grandeur pour l'Europe

PHILIPPE PEYLIN ET PHILIPPE CIAIS

Les flux de carbone échangés entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère, aux petites comme aux grandes échelles, ont une variabilité très importante d'une année sur l'autre (≈ 100 %), liée aux fluctuations des régimes de temps et du climat. Les processus qui contrôlent la réponse des flux de carbone au climat sont en revanche encore mal connus ce qui représente un sérieux handicap pour prédire les bilans de carbone à toutes les échelles (c'est-à-dire effets du réchauffement sur la respiration, du stress hydrique sur la photosynthèse. . .). C'est pourquoi l'étude des variations interannuelles du cycle du carbone continental permet de disposer « d'expériences en grandeur nature » pour comprendre ces processus et leur interaction, et, à terme, mieux comprendre et prévoir les impacts du changement climatique à venir.

Il est généralement reconnu que l'impact premier du changement climatique se fera au travers des changements d'intensité et de fréquence des événements extrêmes et non des changements de condition moyenne. Par exemple, bien que les forêts Européennes soient vulnérables à une diminution des précipitations moyennes estivales, il est presque certain que ce sont les extrêmes – sécheresse et tempêtes – qui causeront les plus grands dommages avec des destructions probablement irréversibles d'écosystèmes ou le remplacement de certaines espèces par d'autres. Souvent lorsqu'un incendie détruit une forêt, celle-ci est remplacée par une forêt de type très différent ou un milieu de type buisson ou savane. En moyenne, durant les deux derniers siècles, les tempêtes ont été responsables pour environ 50 %, les incendies 16 %, et les attaques d'insectes 16 %, des dommages totaux. Une augmentation des sécheresses dans le futur est donc susceptible d'augmenter l'ensemble des préjudices par le feu et les insectes.

Tant que la variabilité du climat ne sort pas d'un régime normal, les perturbations observées restent de petite amplitude et ne sont donc pas de véritables analogues du changement futur. Ainsi l'étude des années **climatiques extrêmes** revêt un intérêt scientifique tout particulier. Depuis plus de 10 ans, nous assistons à une augmentation générale du nombre de sècheresses dans différentes régions au nord de 20° N, avec potentiellement des conséquences fortes sur le stockage de carbone par la végétation et les sols. L'Europe a eu la « chance scientifiquement » de connaître en 2003 et 2005 deux événements climatiques extrêmes qui pourraient, hélas, préfigurer des conditions du siècle prochain.

En 2003, les régions d'Europe centrale et d'Europe de l'Ouest ont subi l'une des plus fortes vagues de chaleur et sécheresse connues (Schaer *et al.,* 2004). C'est la combinaison de températures extrêmement élevées en Juillet et en Août et d'un sévère déficit pluviométrique qui a conduit à une mortalité anormalement élevée, notamment chez les personnes âgées en France, à une altération de certains écosystèmes forestiers (figure A2.1), à une baisse historique des rendements de certaines cultures d'été (figure A2.2a) et à des incendies de forêt dans le sud de l'Europe. L'occurrence simultanée de températures élevées



Figure A2.1
Conséquences de la sécheresse durant l'été 2003 : arbres desséchés avec feuilles brunes dans le sud de la France.

et d'une forte sécheresse a donc eu un impact exceptionnel sur le fonctionnement de la végétation, et sur le cycle du carbone, à l'échelle de tout le continent Européen.

Une équipe de chercheurs a analysé les changements de flux de carbone en 2003 pour un ensemble d'écosystèmes Européens (Ciais *et al.,* 2005 ; Reichstein *et al.*, 2007 ; Vetter *et al.,* 2008). Ils ont mesuré une baisse de la croissance des végétaux d'environ 30 % par rapport à la normale (moyenne 1998-2002). La photosynthèse a réagi plus rapidement au stress hydrique et peut-être thermique que la décomposition du carbone dans les sols par l'activité microbienne. Aussi, on observe une baisse de l'absorption de carbone par photosynthèse avant une baisse des émissions liées à la respiration, dans les mesures de « tours à flux » où un suivi régulier des échanges de CO_2, vapeur d'eau, et chaleur (sensible et latente) est effectué (mesures au-dessus de la canopée par la méthode des fluctuations turbulentes). Pendant la période juillet-août, certains écosystèmes sont même devenus des sources de CO_2 alors que cette saison correspond en moyenne à un puits maximal. En utilisant des modèles d'écosystèmes auxquels on impose en condition aux limites les variations observées du climat, on peut estimer que cette source anormale de CO_2, définie comme une anomalie par rapport aux flux d'une année moyenne, est de l'ordre de 0,3 à 0,5 Pg C, soit une quantité équivalente à un tiers des émissions européennes de CO_2 fossile annuelles par les transports, le secteur résidentiel et l'industrie (Ciais *et al.,* 2005) !

En moyenne, les forêts européennes sont un puits de carbone de l'ordre de 0,1 Pg C par an (Janssen *et al.,* 2003). La perte de CO_2 par les écosystèmes européens en été 2003 a donc annulé environ 3 à 5 années moyennes de séquestration. Les rendements de certaines cultures montrent aussi une forte baisse

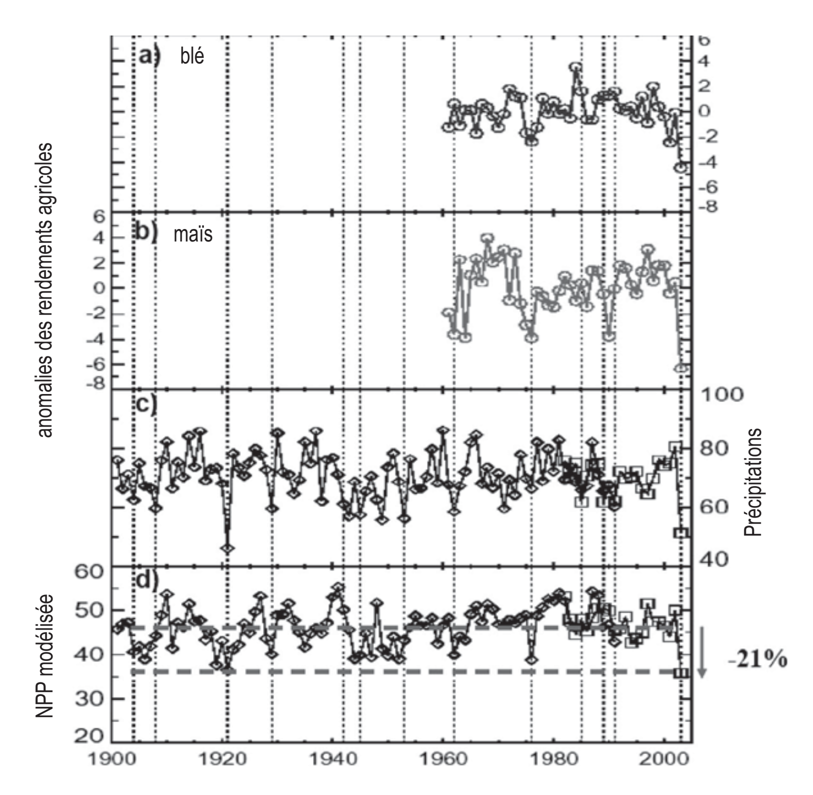


Figure A2.2
Changements en France et en Italie au cours du dernier siècle des rendements agricoles observés et de la productivité primaire net (NPP) modélisée, en réponse aux variations climatiques. a) Rendements du blé d'hiver : moyenne pondérée par la surface, après soustraction d'une tendance linéaire pour s'affranchir des effets liés à l'amélioration des pratiques agricoles et révéler la variabilité induite par le climat. b) Identique pour le Mais. c) Précipitation annuelle sur le même domaine. d) NPP simulée, obtenue en moyennant tous les points de grille représenté par des cultures en France et en Italie. Les lignes verticales en pointillés indiquent les années les plus sèches de la dernière décennie. (Ciais et al., 2005).

(figure A2.2a,b). On a observé une récolte de 36 % inférieure à la moyenne pour le mais dans la plaine du Po, en Italie (Smith *et al.*, 2009). Le CO_2 atmosphérique est incorporé par les végétaux par diffusion dans la feuille et carboxylation (processus dit de photosynthèse). La diffusion est contrôlée par l'ouverture des stomates (de minuscules orifices qui couvrent la surface des feuilles et permettent l'entré du CO_2 et la transpiration de H_2O). Lors de stress hydrique, l'ouverture des stomates qui définit la conductance du couvert végétal est fortement réduite, et limite la fixation de CO_2 (Breda *et al.*, 2006). Le stress hydrique agit aussi directement sur la réaction de photosynthèse (carboxylation) et la fixation du CO_2. Cette absorption diminuée du CO_2 limite la production des sucres qui entrent dans la fabrication des tissus végétaux et servent de substrat pour la maintenance des plantes. L'émission de CO_2 associée à la respiration des plantes a par conséquence aussi diminuée avec la photosynthèse en 2003.

Dans le sol, la décomposition de la matière organique est contrôlée directement par l'activité des microorganismes, activité qui augmente avec la température, mais qui diminue avec la sécheresse. En 2003, il semble que l'effet de la sécheresse fut prépondérant et que l'activité microbienne ait été réduite. En résumé, les processus biologiques sont généralement réduits par le manque d'eau, et les écosystèmes européens se sont tout simplement arrêtés de fonctionner pendant les vagues de chaleur de l'été 2003. Certains arbres ont perdu leurs feuilles, et plusieurs peuplements forestiers ont connu une mortalité anormalement forte. Toutefois, en automne nous avons eu un retour à des conditions de fonctionnement moins inhabituelles.

Il existe néanmoins des effets à plus long terme directement induit par de tels événements extrêmes. Le dépérissement, la mortalité, ou la vulnérabilité accrue aux attaques de pathogènes et d'insectes des forêts sont autant de conséquences encore mal connues mais potentiellement dramatiques. On a observé quelques cas de croissance forestière plus faible en 2004 comme pour la hêtraie de Hesse (Granier *et al.*, 2007), et dans les Cévennes où l'attaque d'insectes a causé une baisse de la surface foliaire (Rouault *et al.,* 2006). Les relations de causalité entre sécheresse d'une année et effets retard les années suivantes sont cependant mal connues.

Ces événements extrêmes sont donc de véritables expériences en vraie grandeur du changement climatique futur, qui offrent aux équipes de recherche une formidable opportunité pour tester la qualité des modèles et des prédictions, en les comparant à des mesures du fonctionnement de la végétation dans des conditions exceptionnelles, au-delà des régimes de variabilité qui ont servi à calibrer les mêmes modèles.

Par exemple, le modèle de végétation ORCHIDEE, développé à l'IPSL (Krinner *et al.*, 2005), a montré d'assez bonnes performances pour reproduire l'arrêt brutal de la photosynthèse observé sur plus de 30 tours à flux en Europe. Cela donne une meilleure confiance dans les capacités prédictives de tels modèles numériques. Pourtant, si l'on peut calibrer et valider ces modèles localement, ce sont les effets à grande échelle qui restent difficiles à tester et à vérifier par des observations. On peut par exemple utiliser des mesures de télédétection spatiale de l'activité de la végétation, ou bien des données qui ont une grande représentativité spatio-temporelle, comme les statistiques des rendements agricoles sur diverses régions européennes. La figure A2.3 compare la répartition spatiale de l'anomalie du flux net de carbone simulée pour l'été 2003 (modèle ORCHIDEE) avec une mesure spatiale de l'anomalie du fonctionnement de la végétation (indice fAPAR du capteur MODIS). La relative bonne concordance entre simulations et observations spatiales traduit en partie la performance des modèles mécanistes actuels.

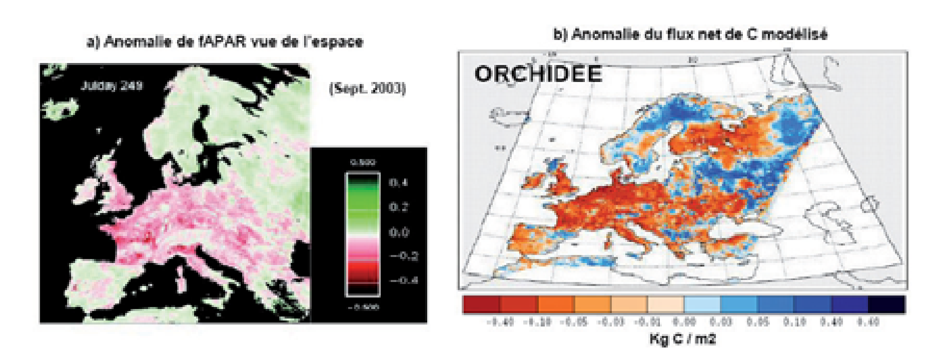


Figure A2.3
a) Distribution spatiale de l'anomalie de fAPAR (fraction de la radiation photosynthétique absorbée par la végétation) vue par le capteur spatial MODIS. b) Distribution spatiale de l'anomalie du flux net de carbone échangé entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres pour l'année, par rapport à la moyenne 1998-2002, pour l'Europe, à partir d'une simulation avec le modèle ORCHIDEE (Vetter et al., 2008).

Pour 2003, nous avons constaté dans de nombreuses régions une baisse très forte des rendements agricoles, en particulier pour les cultures d'été comme le maïs, et ce en dépit d'une marge d'adaptation des pratiques agricoles et des itinéraires techniques (irrigation, récolte anticipée). Ces résultats sonnent comme un avertissement pour le futur, en ce qui concerne les limites de l'adaptation des écosystèmes et de leur gestion pour des conditions extrêmes.

Un événement comme l'été 2003 a donc des conséquences semble-t-il plus importantes que ce qui pouvait être prévu sur les flux de CO_2 et le fonctionnement biophysique des écosystèmes. Les scénarios régionaux du changement climatique en Europe (Seneviratne *et al.*, 2006) montrent que de telles vagues de chaleur seront dans l'intervalle « normal » de variabilité en 2050, et même dans la fourchette basse en 2100. En particulier, l'étendue des régions potentiellement affectées par des sécheresses d'été pourrait fortement augmenter, et s'étendre depuis la Méditerranée vers l'Europe Centrale et les pays de l'Est (Seneviratne *et al.,* 2006). L'étude de l'impact des extrêmes climatiques sur les écosystèmes terrestres, s'il fait l'objet actuel de plusieurs programmes de recherche nationaux (projet « CarboFrance » du GICC) ou internationaux (projet « CarboEurope »), reste cependant trop faible compte tenu des enjeux en cause.

Recommandations

Compte tenu des enjeux fondamentaux liés à la dynamique des écosystèmes continentaux en liaison avec les changements climatiques à venir et à notre

manque de connaissance des processus clés contrôlant la réponse de ces écosystèmes notamment aux événements climatiques extrêmes, il devient urgent de :

1. Mettre en place un suivi à long terme du fonctionnement de la végétation et de la réponse aux événements extrêmes, à l'aide de tours à flux, de mesures de concentration du CO_2 atmosphérique, de données de télédétections spatiale, et de données d'inventaires de biomasse tant aérienne que dans les sols.

2. Développer la validation et les performances d'outils de simulation numérique qui vont de l'échelle locale à régionale et continentale, afin de quantifier et de comprendre la réponse aux extrêmes climatiques des flux de CO_2, H_2O et énergie entre couverts végétaux et atmosphère.

3. Intégrer ces connaissances biophysiques dans les modèles de prévision du climat futur, afin de prendre en compte les rétroactions climatiques de la végétation sur le climat pour améliorer les prédictions.

Références bibliographiques

Breda N. *et al.* (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science,* **63** (6): 625-644.

Ciais P. *et al.* (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature,* **437**: 529-533.

Granier A *et al.* (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology,* **143**: 123-145.

Janssens I. *et al.* (2003). Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO_2 emissions. *Science,* **300**: 1538-1542.

Krinner G. *et al.* (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles,* **19**: 1.

Reichstein M. *et al.* (2007). A combined eddy covariance, remote sensing and modeling view on the 2003 European summer heatwave. *Global Change Biology,* **13**: 634–651.

Rouault G. *et al.* (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science,* **63** (6): 613-624.

Schaer C. *et al.* (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature,* **427**: 332-336.

Seneviratne SI. *et al.* (2006). Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature,* **443**: 205-209.

Smith P. *et al.* (2009). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *JGR*.

Vetter M. *et al.* (2008). Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly in Europe using seven models. *Biogeosciences,* **5**: 561–583.

ANNEXE 3

Événements climatiques extrêmes et chaos social dans les sociétés antiques de Méditerranée orientale

DAVID KANIEWSKI ET ÉLISE VAN CAMPO

Les simulations les plus récentes prédisent la possibilité d'événements climatiques extrêmes dans les régions méditerranéennes. La diminution globale des précipitations et l'allongement de la sécheresse estivale provoqueront un problème majeur de raréfaction de la ressource en eau, aux conséquences dramatiques sur les écosystèmes naturels et anthropisés, ainsi que sur leur biodiversité. Les changements de végétation en Méditerranée ne sont pas chose nouvelle. Ils ont accompagné l'histoire du climat depuis des millions d'années, et l'action conjointe du climat et de l'homme depuis des millénaires. Ces changements peuvent être identifiés grâce à l'analyse d'indicateurs végétaux fossiles (principalement les pollens) contenus dans les archives sédimentaires. En fait, les fluctuations du climat ont largement influencé les stratégies d'occupation de l'espace des hommes du Néolithique, leurs stratégies de subsistance et l'évolution de leurs structures sociopolitiques.

Les territoires qui bordent la Méditerranée orientale sont à cet égard riches en enseignements. Situés à la transition des domaines méditerranéen et subtropical, ils ont abrité le berceau de l'agriculture dans le Croissant Fertile et ont vu se succéder de nombreuses civilisations. Ils sont riches en sites archéologiques dont l'étude, intégrée à celle de l'évolution de l'environnement régional, permet de mettre en évidence les réponses culturelles aux aléas climatiques à des échelles pluridécennales voire pluriséculaires. Aux alentours de 2000 avant Jésus-Christ (av. J.-C.), l'effondrement de l'empire akkadien en Mésopotamie (Weiss *et al.*, 1993), la disparition de la civilisation harappéenne (ou civilisation de l'Indus) (Staubwasser et Weiss, 2006) et la chute de l'Ancien Royaume d'Egypte (Stanley *et al.*, 2003) ont tous été associés à une brusque aridification du climat, observée à l'échelle globale (deMenocal, 2001 ; Weiss et Bradley, 2001). À la fin de l'âge du Bronze vers 1200 av. J.-C., un autre événement sec, prolongé et d'ampleur hémisphérique retient l'attention. L'archéologie révèle l'existence, à cette époque, d'une succession de catastrophes socioéconomiques et politiques en Asie occidentale et dans les grandes cités grecques, anatoliennes et levantines (Neumann et Perpola, 1987). Ce nouvel effondrement de la plupart des royaumes du Proche-Orient est traditionnellement attribué aux invasions des Peuples de la mer (Gilboa, 2007).

L'étude palynologique d'un sondage prélevé près du site de Tell Tweini-Gibala le long du littoral syrien a permis d'évaluer les impacts de la péjoration climatique de la fin de l'âge de Bronze sur la dynamique des écosystèmes côtiers du nord de l'ancienne Phénicie, et de montrer ses conséquences sur l'effondrement du célèbre royaume d'Ougarit qui incluait Gibala (Kaniewski *et al.*, 2008). Après 800 ans de climat relativement humide, les plaines côtières de la Syrie voient se succéder à partir de 1200 av. J.-C. des phases de sécheresse de plus en plus intenses, qui se prolongent sur plusieurs décennies voire plus d'un siècle. De fait, en trois cents ans, les paysages de forêts claires se transforment en steppes et en déserts plus ou moins salés. L'installation progressive de l'aridité

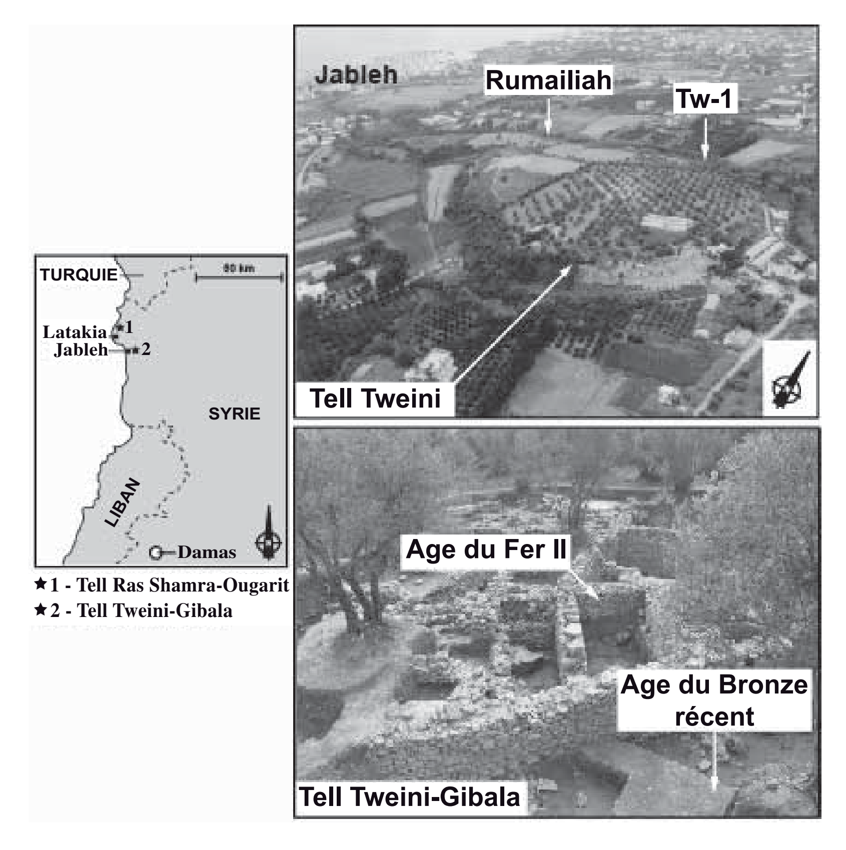


Figure A3.1
Localisation géographique de Gibala-Tell Tweini et de la plaine alluviale de Rumailiah dans laquelle a été réalisé le sondage TW-1. Les habitations de la fin de l'Age du Bronze et de l'Age du Fer II sont mises en évidence sur le site archéologique.

est ponctuellement interrompue par de courtes périodes de fortes précipitations, aux crues et aux inondations probablement dévastatrices. Parallèlement à l'évolution de l'environnement naturel, on dispose d'un indicateur de la disponibilité en ressources alimentaires grâce aux pollens marqueurs de l'agriculture et de l'arboriculture (essentiellement céréales, vigne et olivier). On observe une relation très directe entre les périodes sèches et celles de faible productivité agricole, vraisemblablement génératrices de famines et de profonds désordres socioéconomiques.

En Méditerranée orientale, il apparaît alors clairement que des causes climatiques sont en grande partie à l'origine du chaos social et culturel des « Âges Sombres » qui marquent la transition entre Âge de Bronze et Âge de Fer. Cette démonstration se trouve confortée par la découverte et la datation de restes

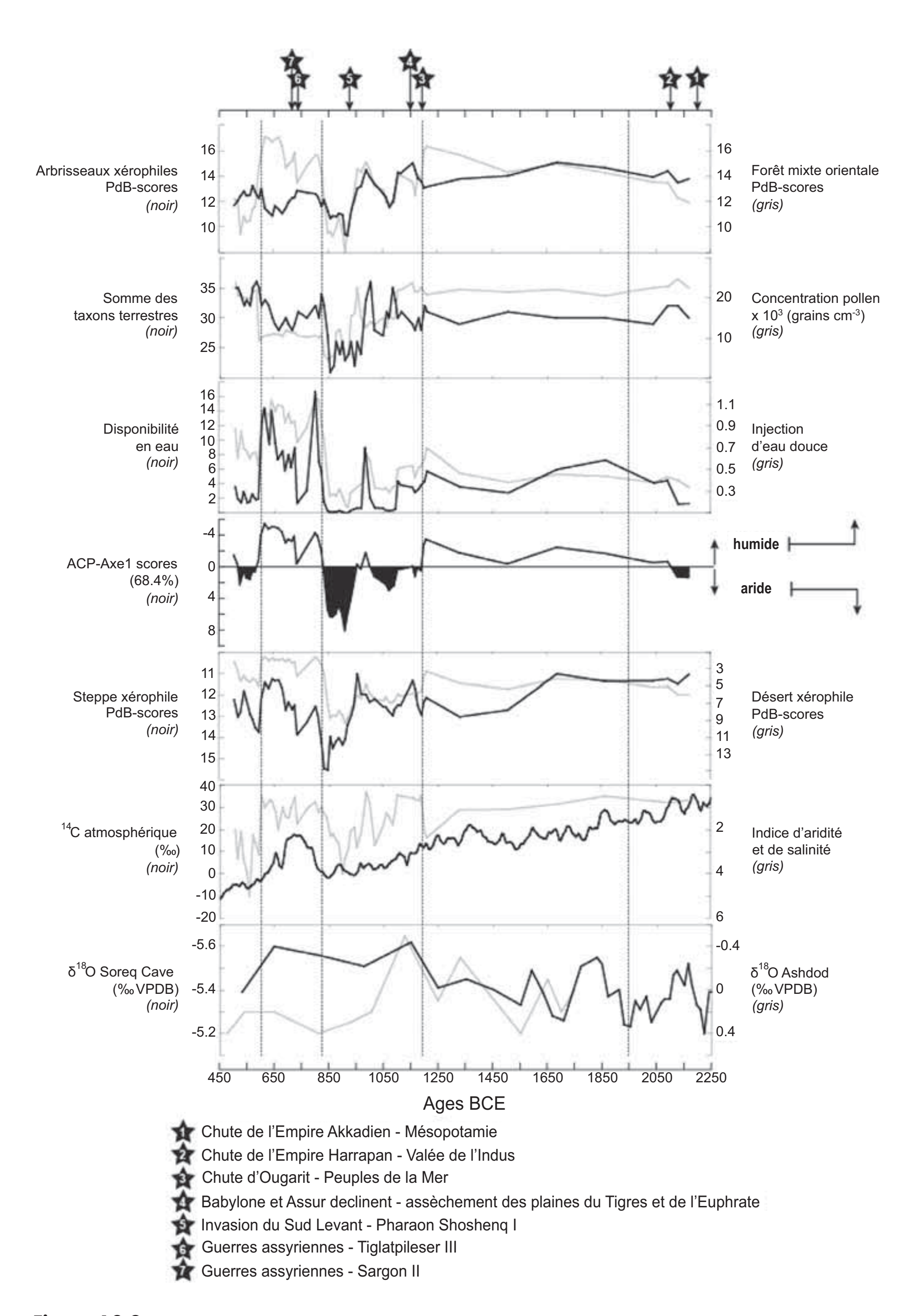


Figure A3.2

Évolution environnementale entre 2250 et 450 ans av. J.-C. le long du littoral syrien. Les principaux faits archéologiques sont indiqués sous forme d'étoiles.

végétaux carbonisés dans le niveau archéologique correspondant à la destruction de Gibala par les Peuples de la mer. La mise à feu de Gibala aux alentours de 1000 av. J.-C suit de plus d'un siècle la chute de la cité d'Ougarit survenue entre 1192 et 1185 (Yon, 2006). Elle témoigne d'au moins deux phases successives d'invasions militaires et de mouvements de populations chassées par la disette et attirées vers des zones moins défavorisées, sur la côte ou à proximité de sites de résurgence d'eau douce locaux.

Ces nouvelles preuves des liens étroits entre bouleversements politiques et culturels et événements climatiques extrêmes au sein des sociétés antiques du Proche et Moyen-Orient ne permettent nullement de prédire les réponses possibles des sociétés actuelles qui occupent ces territoires aux évolutions futures du climat. Elles proposent néanmoins une réflexion sur la viabilité des sociétés complexes confrontées à une forte variabilité de leur environnement.

Références bibliographiques

deMenocal PB. (2001). Cultural responses to climate change during the late Holocene. *Science*, **292**: 667-673.

Gilboa A. (2006-2007). Fragmenting the Sea Peoples, with an Emphasis on Cyprus, Syria and Egypt: A Tel Dor Perspective. *Scripta Mediterranea*, 27-28, 209-244.

Kaniewski D. *et al.* (2008). Middle East coastal ecosystem response to middle-to-late Holocene abrupt climate changes. *PNAS,* **105**: 13941-13946.

Neumann J., Perpola S. (1987). Climatic change and the eleventh-tenth-century eclipse of Assyria and Babylonia. *Journal of Near Eastern Studies,* **46**: 161-182.

Stanley JD. *et al.* (2003). Nile flow failure at the end of the Old Kingdom, Egypt: strontium isotopic and petrologic evidence. *Geoarchaeology*, **18**: 395-402.

Staubwasser M., Weiss H. (2006). Holocene climate and cultural evolution in the late prehistoric-early historic West Asia. *Quaternary Research,* **66**: 372-387.

Weiss H., Bradley RS. (2001). What drives societal collapse ? *Science,* **291**: 609-610.

Weiss H. *et al.* (1993). The genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization. *Science,* **261**: 995-1004.

Yon M. (2006). *The City of Ugarit at Tell Ras Shamra.* Eisenbrauns.

ANNEXE 4

Table des matières du numéro thématique des *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*

Dans le cadre de la préparation de ce rapport, le groupe de travail « Écosystèmes et événements climatiques extrêmes » a organisé un colloque international en juillet 2007, à l'origine du numéro thématique des Comptes Rendus Geoscience dont le sommaire est reproduit ci-après.

Vol 340 - N°9-10 - septembre-octobre 2008
Ecosystems and extreme climatic events
Écosystèmes et événements climatiques extrêmes
pages 553-699

Groupe de lecture critique

COMPOSITION DU GROUPE DE LECTURE CRITIQUE

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset)

Jean-Nicolas ORMSBY	Adjoint du chef du département « Expertise en santé environnement travail »

Centre nationale de la recherche scientifique (CNRS)

Stéphanie THIEBAULT	Directrice scientifique adjointe – Institut écologie et environnement

Délégation au développement durable

Pascal DOUARD	Adjoint au chef de la Délégation au développement durable du Commissariat général au développement durable

Direction générale de la santé

Yves COQUIN	Directeur de projet à la Direction générale de la santé

Fondation pour la recherche sur la biodiversité

Bernard DELAY	Président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité

Institut national des sciences de l'univers (Insu/CNRS)

Pierre FRIEDLINGSTEIN	Chargé de mission Océan-Atmosphère (Système Terre) Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre Simon Laplace

Météo-France

Philippe BOUGEAULT	Directeur de recherche de Météo-France

Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels (MRN)

Roland NUSSBAUM	Directeur de la Mission risques naturels

Philosophe des sciences

Jean-Pierre DUPUY	Professeur à l'École polytechnique et à l'Université de Stanford

Les membres du Groupe de lecture critique, désignés par le président ou le directeur général de leur établissement, ont examiné le texte du rapport puis, au cours d'une réunion qui s'est tenue à l'Académie des sciences le 14 octobre 2009, ont entendu la présentation de M. Henri Décamps, animateur du groupe de travail, et se sont exprimés.

Ils ont formulé des remarques, dont certaines ont été intégrées, avec leur accord, dans le rapport ; deux commentaires font l'objet de contributions signées des auteurs : elles sont présentées ci-après.

COMMENTAIRE DE JEAN-PIERRE DUPUY

Professeur de philosophie sociale et politique à l'École polytechnique (*emeritus*) et à l'université Stanford, Californie.

Événements extrêmes et catastrophisme éclairé

Le rapport de l'Académie des sciences se réfère à l'attitude philosophique face aux risques extrêmes que j'ai nommée le « catastrophisme éclairé ». Il comporte aussi un exposé de Bernard Derrida, succinct mais très clair, sur une classe de « modèles simples donnant lieu à des événements extrêmes ». Enfin, il ne dit rien, parce que tel n'était pas son objet, au sujet des crises financières en général, et de la crise actuelle en particulier. Ces trois éléments mis ensemble m'ont inspiré les réflexions suivantes.

De la probabilité des événements extrêmes

Non seulement la crise écologique et la crise économique s'articulent l'une à l'autre, se renforçant mutuellement, elles ont en commun des traits tout à fait singuliers. Celui qui m'intéresse ici est un thème devenu familier dans les discussions qui portent sur les conséquences du changement climatique ; il n'a pas encore acquis le même caractère public lorsqu'il s'agit de la crise financière, mais cela ne saurait tarder. S'il est avéré, le réchauffement climatique va accroître considérablement – c'est peut-être déjà le cas – la fréquence de survenue d'événements extrêmes : cyclones, tempêtes, crues, déluges, sécheresses, etc., atteindront plus souvent des intensités ou des niveaux très élevés. Notons que la notion intuitive de caractère extrême mêle deux dimensions orthogonales l'une à l'autre : l'amplitude du phénomène et sa rareté. Puisque les événements que l'on considère sont aléatoires – certains n'hésitent pas à parler de hasard « sauvage » – l'outil statistique qui les représente a la nature d'une distribution de probabilités.

Comme le rappelle Bernard Derrida, un type de distribution de probabilités retient de plus en plus l'attention des spécialistes, qui tend à remiser la rassurante courbe en cloche ou loi normale. On le retrouve dans à peu près tous les domaines où des événements catastrophiques menacent de se produire : les crues des grands fleuves, les cyclones de la région caraïbe, les éruptions volcaniques et les tsunamis de l'océan indien, les incendies des régions méditerranéennes et . . . les bulles financières et leur éclatement. Ce type de distribution donne aux événements extrêmes une probabilité relativement faible, certes, mais considérablement supérieure à celle que leur accorde la loi normale. Le poids d'un

événement aléatoire est le produit de son amplitude par sa probabilité. Si des amplitudes immenses ont une probabilité faible, mais non infiniment petite, la catastrophe majeure, bien qu'improbable, va peser d'un poids très lourd dans ce à quoi il faut s'attendre. L'ombre portée par sa survenue éventuelle obscurcit nos perspectives d'avenir.

À ma connaissance, c'est le sociologue italien Vilfredo Pareto qui, le premier, formula le concept de cette distribution. Pareto, qui avait rejoint Léon Walras en Suisse pour former avec lui l'école de Lausanne, le berceau de l'économie néo-classique, s'intéressait à l'allure de la distribution des revenus dans chaque pays. Il observa que partout cette distribution était telle que la moyenne des revenus supérieurs à un revenu donné était dans un rapport constant avec le revenu en question. Si ce rapport est, disons, égal à 1,3, cela veut dire que la moyenne des revenus supérieurs au Smic est égale à 1,3 fois le revenu du smicard, et que la moyenne des revenus supérieurs à celui du *trader* de la BNP Paribas est égale à 1,3 fois le revenu du *trader*.

Pareto comprit la raison pour laquelle cette distribution se rencontrait à peu près partout, pour ce qui est de la répartition des revenus. Imaginons, dit-il, une pluie de dix mille jetons qui s'abat uniformément sur une région où se trouvent cent coupes prêtes à les recevoir. Les jetons tombant indépendamment les uns des autres, la distribution du nombre de jetons par coupe va obéir à la loi normale. La plupart des coupes contiendront un nombre de jetons qui ne sera pas très éloigné de la moyenne, soit cent jetons. Rares seront les coupes qui contiendront très peu de jetons ou au contraire plusieurs centaines. Changeons maintenant les conditions de l'expérience en posant qu'une coupe donnée a d'autant plus de chances d'attirer les jetons qui tombent qu'elle en contient déjà un grand nombre. La distribution des jetons sur l'ensemble des coupes acquiert alors une tout autre physionomie. Les déviations par rapport à la moyenne qu'admet la loi normale se trouvent amplifiées par un mécanisme d'autorenforcement. Les événements extrêmes y acquièrent une probabilité considérablement accrue. Telle est l'origine de ce qu'on appelle aujourd'hui, en économie, la distribution de Pareto : plus on est riche, plus on a de chances de le devenir encore davantage.

Il est facile de reconnaître dans cette distribution une loi puissance au sens des physiciens. C'est aussi une loi « fractale », au sens de Benoît Mandelbrot[1]. Il en résulte des propriétés très remarquables.

[1] Outre ces trois appellations, Pareto, loi puissance, fractale, la distribution que je considère est aussi caractérisée, en anglais courant, par l'expression « *fat tail* ", malaisément traduisible en français, qui se réfère à la queue de la distribution, laquelle donne un poids élevé aux événements extrêmes. On trouve dans la littérature le terme « vols de Lévy » pour désigner des marches au hasard dont les pas ont une longueur qui se distribue selon une loi puissance. La variété non encore fixée de la terminologie témoigne de ce que la forme en question a été découverte plus ou moins simultanément dans les domaines les plus divers, qui ont eu chacun pour soi à la baptiser.

Une distribution fractale est telle que la moyenne des valeurs supérieures à une valeur donnée est dans un rapport constant avec cette dernière. Considérons la distribution des espérances de vie dans un pays où pèse encore d'un poids important la mortalité infantile. Beaucoup d'enfants meurent à la naissance ou dans les premiers mois de la vie. Mais si un enfant survit à ce stade, il est probable que cela est dû à une constitution particulièrement favorable et que son espérance de vie *encore à vivre* est grande. Cette relation peut s'étendre jusqu'à un âge plus avancé : plus on a vécu d'années, plus le nombre d'années encore à vivre est grand. C'est une relation fractale. Hélas, elle ne continuera pas indéfiniment. Il arrive forcément un âge où chaque année supplémentaire de vie, loin de s'accompagner de l'espérance que le nombre d'années encore à vivre s'accroît, rapproche inexorablement du terme.

De la certitude d'être surpris

Dans ce qui suit, je vais me concentrer sur l'exemple des événements extrêmes en économie, et dans le système financier en particulier. Comme je vais me limiter aux aspects formels, la transposition aux événements climatiques, ou écologiques en général, ne pose pas de problème particulier. Sur le fond, le cas de la crise financière est éminemment instructif. À en croire les économistes, les mécanismes qui ont conduit à la crise sont en gros élucidés. Tout s'explique rétrospectivement, ou presque. Et, cependant, la crise a frappé tout le monde par surprise. Qui imaginait durant l'été 2007, et même au printemps 2008, qu'une crise très localisée dans le secteur du marché des emprunts hypothécaire aux États-Unis allait faire vaciller sur sa base tout le système financier mondial ? Il y a donc eu un effet de surprise considérable, mais le fait qu'il y ait eu cette surprise, lui, ne fut pas, ou en tout cas, n'aurait pas dû être une surprise. C'est une bonne leçon à retenir pour ce qui est des catastrophes écologiques à venir : elles nous prendront par surprise, cela au moins est sûr.

Pour faire sentir ce qu'a de singulier la distribution fractale, Mandelbrot eut recours jadis à un très bel apologue. Imaginons une région recouverte en permanence par un brouillard épais, où se trouvent un nombre indéfini d'étendues d'eau. Certaines sont de simples mares, d'autres des lacs, d'autres de véritables océans. La distribution des tailles de ces étendues d'eau est fractale. On s'engage sur l'une d'entre elles en bateau. Le brouillard interdit de voir la rive opposée tant que l'on se trouve distant d'elle à plus d'une journée de navigation[2].

[2] Benoît Mandelbrot a publié cet apologue pour la première fois, à ma connaissance, en 1970, dans un numéro devenu aujourd'hui introuvable de la revue *Les Annales des Mines*. On trouvera dans son livre *Une approche fractale des marchés*, Odile Jacob, 2004, une introduction à la théorie générale des fractals avec application aux marchés financiers. Ce livre prémonitoire publié avant la crise semble être passé complètement inaperçu des principaux intéressés. Pour citer le titre d'une interview très récente de Mandelbrot, il y annonçait qu' « il était inévitable que des choses très graves se produisent. » [*Le Monde*, 18-19 octobre 2009]. En anglais, voir Benoît Mandelbrot, *The (Mis)behavior of Markets*, Basic Books, 2004 ; et *Fractals and Scaling in Finance*, Springer, 1997.

Plus longue la navigation aura été sans que la rive opposée apparaisse, plus le navigateur aura de raisons objectives de croire que le nombre de jours qu'il lui reste à passer sur son bateau est grand. Il ne voit pas la rive opposée. Il ne peut donc la prendre pour un terme fixe. Il raisonne au contraire comme ceci : le temps déjà important que j'ai passé sans voir le terme rend probable que je me trouve sur une étendue d'eau de taille considérable. Il est donc probable que le chemin à parcourir est encore long. Cependant, le terme apparaîtra tôt ou tard à la vue. Et c'est au moment où le navigateur est sur le point de le voir qu'il croit, le plus rationnellement du monde, en être le plus éloigné. Plus le navigateur a attendu de jours avant que ce moment arrive, plus l'effet de surprise est brutal.

Je conjecture que tel fut l'état d'esprit du navigateur Bernard Madoff sur la haute mer du banditisme. Plus sa pyramide s'évasait avec l'apport permanent et croissant de nouveaux clients, plus il avait de raisons de supposer que la pyramide allait continuer de le faire. Et pourtant, il ne pouvait ignorer que le terme viendrait et que tout son système s'écroulerait alors comme un château de cartes. La surprise fut d'autant plus terrible que le schème avait marché longtemps.

Il serait injuste et faux de faire un sort particulier à l'escroc Madoff. Mandelbrot a montré empiriquement que les phénomènes de spéculation sont régis par une loi fractale. Dans la phase euphorique, lorsque la « bulle » gonfle, plus on est optimiste, plus on a de raisons de l'être encore plus. C'est au moment où la bulle est sur le point d'éclater que l'euphorie est la plus forte[3].

La théorie que je viens de présenter existe depuis de nombreuses années et elle a été maintes fois validée par l'expérience. Elle est connue de nombre des acteurs qui constituent le monde financier. Et si certains ne la connaissent pas, leur ignorance est coupable[4]. Prenons donc le point de vue de quelqu'un qui connaît la théorie. Est-ce que cela change son comportement ? C'est toute la question du choix rationnel en avenir incertain caractérisé par un « hasard sauvage ». J'ai pu montrer que la métaphysique temporelle qui est à la base de la théorie de la décision, de ses premières formulations (John von Neumann, Leonard Savage) jusqu'à ses avatars les plus récents et les moins conceptuellement assurés, tel le fameux principe de précaution, rendait impossible de résoudre

[3]Voir Jean-Pierre Dupuy, *La panique*, Les empêcheurs de penser en rond, 2002.

[4]Le livre de Christian Walter et Michel de Pracontal, *Le virus B. Crise financière et mathématiques*, Seuil, 2009, montre que le monde de la finance reste incurablement attaché à la loi normale (le *B* du titre se réfère au mouvement brownien, une marche au hasard dont les pas obéissent à cette loi). Les auteurs attribuent une grande part de la crise financière à la sous-estimation flagrante de l'importance des événements extrêmes dont se sont rendus coupables les agents économiques et financiers.

cette question. Il faut, pour se donner une chance d'y arriver, se placer dans une tout autre conception du temps, que j'ai nommée le temps du projet[5].

Je dois ici me contenter de souligner le paradoxe qui est au cœur de la solution que je propose. La prudence face au hasard fractal dicte une maxime : plus on a de raisons objectives d'être optimiste, plus on se doit d'être catastrophiste et de se tenir sur ses gardes, car le terme est sans doute proche. Cette injonction contradictoire se résout en théorie en comprenant que l'optimisme est rationnel à un niveau et le catastrophisme à un autre, qui transcende le premier, en ce qu'il consiste à prendre le point de vue du parcours déjà achevé et non dans son déroulement. C'est cette forme de prudence que j'ai nommée le « catastrophisme éclairé »[6]. Elle implique de se projeter par la pensée *après* la survenue de l'événement extrême et à contempler le chemin parcouru depuis ce point de vue qui conjoint la surprise et la certitude de la surprise.

Annoncer à quelqu'un qu'il va être surpris évoque pour le philosophe un paradoxe célèbre. Le fondateur de la philosophie analytique américaine, W.V.O. Quine, en a donné un commentaire subtil. Voici l'une de ses formes. On annonce un dimanche à un condamné à mort qu'il sera pendu un jour de la semaine qui s'ouvre, sans plus de précision. On ajoute cependant une prédiction qui va se révéler un piège diabolique. Lorsque, le jour choisi pour l'exécution, on viendra le chercher au petit matin pour le mener à l'échafaud, il sera surpris. Revenu dans sa cellule, notre homme se met à raisonner très fort dans l'espoir sans doute empoisonné d'en savoir plus sur le terme de son existence. Il lui paraît évident que ce ne peut être le dimanche suivant. Car il serait encore en vie le samedi à midi et pourrait alors en déduire qu'il serait pendu le lendemain – auquel cas il ne serait pas surpris. Il raye donc le dimanche de la liste des possibles. Mais c'est maintenant au tour du samedi d'être éliminé, puisque, le dimanche n'étant plus une option, le même raisonnement, exactement, sera inévitable le vendredi à midi, si le condamné y est encore en vie. Greffés les uns sur les autres, ces raisonnements le convainquent qu'aucun des jours de la semaine ne peut être *le* jour – et donc, qu'il ne sera pas exécuté. Lorsqu'on vient le chercher au petit matin du jeudi, disons, il en est donc tout surpris – comme on le lui avait annoncé.

Quelle que soit sa correction logique, ce raisonnement, on l'aura compris, s'appuie sur l'existence d'un terme connu : la vie du condamné ne s'étendra pas au-delà du dimanche à venir. Mais c'est précisément cette condition qui n'est pas satisfaite dans l'univers capitaliste. Madoff s'attendait à ce que le flux de

---

[5] « *Projected time* » en anglais. Voir Jean-Pierre Dupuy, « The Precautionary Principle and Enlightened Doomsaying : Rational Choice before the Apocalypse. » *Occasion : Interdisciplinary Studies in the Humanities* 1, no. 1 (October 15, 2009), http ://occasion.stanford.edu/node/28

[6] Jean-Pierre Dupuy, *Pour un catastrophisme éclairé*, Paris, Seuil, 2002.

ses clients s'accroîtrait sans cesse, les spéculateurs espèrent que la bulle continuera toujours de gonfler, les sans-logis américains qui s'endettèrent à cent pour cent pour acheter une maison comptaient sur la croissance illimitée de sa valeur pour réussir à la financer. La condition de possibilité du capitalisme est que ses agents le croient immortel. Son péché originel est qu'il a besoin d'une ouverture indéfinie de l'avenir pour avoir une chance de tenir à tout moment ses promesses. C'est là que s'enracine la sacralisation de la croissance. Il faut que les agents anticipent qu'une expansion se prolongera jusque dans l'avenir le plus éloigné pour que l'état du système à un moment donné soit satisfaisant – le critère essentiel étant le plein emploi. La leçon de Mandelbrot est que plus le terme est différé, plus sa survenue, inévitable, sera brutale.

Les dirigeants de la planète ont remis le capitalisme sur ses rails, sans s'inquiéter, semble-t-il, un seul instant de savoir si ces rails ne menaient pas à l'abîme. Plus la locomotive, encore poussive, prendra de l'allure, plus ils seront optimistes et croiront en un avenir radieux. C'est à ce moment-là qu'ils devraient le plus se méfier des raisons de leur optimisme. La catastrophe les guette peut-être au détour du chemin.

COMMENTAIRE DE LA MISSION DES SOCIÉTÉS D'ASSURANCE POUR LA CONNAISSANCE ET LA PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS

Frédéric Gudin du Pavillon
Président

Roland Nussbaum
Directeur

Cet intéressant recueil de contributions de haute qualité stimule notamment par l'ambition délibérément holistique son approche de la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux, face aux événements climatiques extrêmes. De la part de la haute instance qui le présente, ce fait est encore suffisamment rare pour être souligné. Cette difficile quête de la transdisciplinarité était en effet la difficulté majeure pour aborder sérieusement une question de société aussi transversale et intersectorielle.

Du point de vue des assureurs, saluons évidemment l'intégration d'un chapitre consacré aux aspects économiques, avec deux éclairages très complémentaires, assortis dans le chapitre consacré à la sécurité publique, du point de vue de Denis Kessler, personnalité emblématique de notre secteur en France et en Europe. Non moins remarquable est la prise en compte, par deux d'entre les trois auteurs invités à s'exprimer sur les écosystèmes forestiers et l'agriculture, en tant que socio-écosystèmes sensibles aux enjeux d'adaptation au changement climatique, des possibilités et limites offertes par les outils de transfert de risque.

Sans revenir sur les conclusions du rapport, le présent avis critique développera trois points, que le rapport aurait utilement pu approfondir pour refléter des tendances de fond qui, du point de vue de nombre de professionnels, dont ceux de l'assurance française, entourent l'évolution de la gouvernance de la gestion globale des risques naturels majeurs :

- la prise en compte des apports substantiels de la société de l'information pour informer et sensibiliser les acteurs économiques à la prévention, impliquant un bouleversement dans les pratiques techniques de certains métiers ;

– le rôle essentiel des partenariats public privés pour la réduction de la vulnérabilité aux catastrophes ;

– la perspective européenne et internationale de plus en plus marquée, au sein de laquelle l'assurance joue un rôle clé, pour une meilleure responsabilisation des acteurs à la prise en charge des coûts.

1 | Développement du potentiel de la société de l'information pour informer et sensibiliser les acteurs économiques à la prévention, avec notamment la participation active de certains métiers à leur contact

Avec un dispositif légal et réglementaire qui consacre non seulement une obligation d'information faite :

– aux communes d'une part : loi de 87 introduisant les DCS / DICRIM ;

– lors des transactions immobilières : loi Bachelot de 2003 introduisant l'information de l'acquéreur et du locataire ;

mais aussi des servitudes d'utilité publique, telles que :

– les zonages de PPRN : loi de 1982, révisé par la loi Barnier 1995 ;

– les zones d'expansion de crue : loi Bachelot de 2003.

Ce sont tout un ensemble de professions au contact du public : géomètres experts, notaires, professions immobilières, assureurs, qui s'approprient les technologies géomatiques et leur utilisation dans la société de l'information, pour offrir diverses prestations d'information et de sensibilisation à l'exposition aux aléas naturels, ce qui constitue un premier pas vers une démarche de réduction de la vulnérabilité.

2 | PPP pour la réduction de la vulnérabilité aux catastrophes

Dans le monde entier, les parties prenantes à la réduction de la vulnérabilité aux catastrophes collectives s'accordent à reconnaître la nécessité de développer

diverses formes de partenariats public privé (PPP-DRR), comme garants d'une gouvernance durable de la gestion durable des risques[1]. La typologie proposée ci-après[2], se fondant sur les fonctions d'interfaces ainsi crées et les motivations respectives de la partie publique et de la partie privée, distingue quatre grandes catégories de PPP-DRR, illustrées par quelques exemples en France :

a) ***Politiques publiques DRR impliquant un ou plusieurs PPP***

   – le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles[3], associant État et sociétés d'assurance dans un partenariat durable, de la conception à la gestion du régime, tant au niveau organisationnel et technique (règles de planification urbaine déclinées dans les zonages réglementaires et de construction), financier (garantie de l'État assurant la solvabilité du régime) et politique (effet de levier procuré par la solidarité nationale sur la mutualisation contractuelle, dispositif de traitement des cas rejetés par le marché avec le Bureau central de tarification) ;

   – le Fonds de prévention des risques naturels prévisibles (Fonds Barnier), dans la mesure où ce fonds public est alimenté par un prélèvement sur la surprime d'assurance catnat ;

   – les Commissions départementales de prévention des risques naturels majeurs, dans la mesure où y sont représentés les différentes parties prenantes, publiques et privées, pour une gouvernance territoriale de la gestion des risques.

b) ***Institutions à l'interface public-privé***, telles que[4], en France, les associations thématiques : AFPCN, AFPS, CEPRI, le HCFDC, IPGR, IRMA, MRN, SHF, etc., agissant comme autant de « forums hybrides[5] » entre pouvoirs publics et société civile.

c) ***Actions de sensibilisation, éducation ou formation DRR*** : les exemples sont encore plus nombreux, si l'on en juge notamment par le nombre de colloques et livres blancs à l'initiative notamment des institutions citées ci-dessus et en partenariat avec les pouvoirs publics, mais aussi à l'initiative de ces derniers (cf. par exemple syndicats de rivière et EPTB, structures publiques de gestion des risques).

[1] Cf. Cadre d'Action de Hyogo, objectif 4 : *reducing the underlying risk factors.*

[2] NUSSBAUM Roland, 2008. Partenariats public privé : des atouts pour gérer le risque, Face au risque, n° 444, Dossier Risques naturels, Juillet-Août 2008, pages 17-20.

[3] NUSSBAUM Roland, 2005, **Les partenariats public privé (PPP) pour le développement de l'assurance des catastrophes naturelles en Europe**, Risques, n° 64 – Octobre-Décembre 2005, Dossier Partenariats public/privé, mythes et réalités, pages 86-94.

[4] cf. sites des organismes cités (liste indicative).

[5] CALLON Michel, LASCOUMES Pierre et BARTHES Yannick (2001). **Agir dans un mode incertain. Essai sur la démocratie technique**, Seuil, 2001, collection *La couleur des idées.*

d) ***Projets (R&D, infrastructures), outils, services et produits DRR avec dimension PPP*** : la liste s'avère des plus longues, mais méconnue. De fait, il n'est guère de projet, service ou produit DRR qui ne trouve naissance dans un PPP... Reste à ce que tout le monde y trouve son compte !

L'association « **Mission Risques Naturels** » ou **MRN**[6] a été **créée début 2000** entre la **Fédération Française des Sociétés d'Assurances** (FFSA) et le **Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance** (GEMA), après une année particulièrement sinistrée par des événements catastrophiques naturels (inondations et tempêtes).

Son **objet** est contenu dans son intitulé complet : **Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des Risques Naturels**. Il s'agit en effet pour la profession de l'assurance de contribuer à une meilleure connaissance des risques naturels et d'apporter une contribution technique aux politiques de prévention. Ce groupement technique est dédié à des missions d'interfaces techniques entre la profession de l'assurance et les pouvoirs publics. Cette vocation institutionnelle l'a impliquée dans de nombreuses expériences de PPP des catégories c) et d) décrites ci-dessus en 2. Elle met ainsi à disposition des EPTB, syndicats de rivière et Diren de bassin, les compétences, outils et données qu'elle a mobilisés dans son observatoire de l'exposition des enjeux particuliers et professionnels aux inondations.

3 | Appréhension de l'assurance dans une perspective européenne et internationale

Le système français d'assurance des catastrophes naturelles, certes toujours perfectible, notamment en termes de liens avec les politiques publiques de prévention, constitue, une des références reconnues internationalement, par ses qualités intrinsèques de non exclusion, de remédiation aux phénomènes d'anti-sélection et d'aléa moral, qui se traduisent par le fait que la quasi-totalité des particuliers et des professionnels sont couverts et que le montant des dommages assurés rapporté aux dommages économiques totaux s'y trouve être parmi les plus élevés au monde.

Les débats en cours sur la nécessaire convergence entre les actions et programmes relatifs à l'adaptation au changement climatique d'une part et à la

[6] www.mrn-gpsa.org

réduction des catastrophes d'autre part (DRR) ouvrent l'opportunité d'une clarification de la notion de solidarité économique entre États membres en cas d'extrêmes difficultés consécutives à une catastrophe naturelle (art. 100.2 du Traité), de manière à reconnaître le rôle prépondérant dévolu aux services d'assurance pour l'indemnisation des dommages aux enjeux privés et à faire preuve d'exemplarité vis-à-vis des pays tiers, tant les compétiteurs développés (États-Unis, Japon), que les pays en voie de développement, pour des solutions de PPP privilégiant la responsabilité des acteurs, dans l'organisation de systèmes d'indemnisation des dommages causés par les catastrophes, naturelles en particulier (cf. ci-dessus en 2).

Le développement d'une certaine action normative en matière de prévention individuelle comme de réduction de la vulnérabilité collective (*règles de construction et d'urbanisme)* demeure une condition préalable à une meilleure assurabilité. À l'intérieur de l'Union européenne, c'est aussi une condition nécessaire pour que les externalités liées au coût du risque (prévention et assurance) soient intégrées dans les charges des citoyens et acteurs en concurrence dans le marché intérieur. Si cette intégration ne doit pas exclure les nécessaires solidarités, qui peuvent s'exercer en de telles circonstances notamment, entre citoyens, communautés et États, dans le même temps l'intégration plus complète des coûts du risque est un enjeu majeur pour le commerce international, au même titre que l'intégration d'un prix du carbone. Ne peut-on envisager dans le domaine des risques également, la poursuite d'une stratégie d'intégration des externalités environnementales dans le prix des biens et services, chaque fois que cela est possible et dans les limites de l'acquis communautaire ?

Dans ces conditions, pour une concurrence équitable entre les pays, les territoires et les acteurs économiques dans un contexte d'exposition accrue aux extrêmes climatiques, la bonne gouvernance économique de la gestion des risques naturels implique une combinaison optimale entre instruments de marché et financement public, qui irait dans le sens d'y faire contribuer les différentes catégories d'acteurs concernés et à due proportion :

- d'une part, *via* le **paiement des services environnementaux** liés à la protection, la prévention et la réduction des vulnérabilités de ces patrimoines et activités contre les catastrophes naturelles en distinguant ce qui relève de la responsabilité de chacun de ce qui est du ressort des collectivités publiques, aux différents niveaux de subsidiarité ;

- d'autre part, *via* le **paiement du prix des risques résiduels** à la charge de chaque acteur, en s'appuyant le plus possible sur les instruments de transfert et de financement *ex ante* des risques, à savoir, comme l'a relevé la

Commission européenne dans son Livre vert[7], la mutualisation des risques par des services d'assurance, avec si nécessaire, l'État, comme réassureur de dernier ressort.

Les modalités et délais associés à cet objectif seraient évidemment adaptés selon les niveaux de développement des pays ou régions du monde :

– intégration à relativement court terme pour les pays développés, avec une attention particulière pour la coordination des niveaux d'intégration visés entre l'Union européenne et les autres pays ou régions membres de l'OCDE ;

– intégration par paliers, pour les pays en développement, selon des critères à définir et en couplage avec la clause de conditionnalité de l'aide associée.

C'est précisément au regard des enjeux de résilience économique des citoyens et des acteurs, concourant à la compétitivité des territoires, inscrits comme objectifs au Traité de l'Union européenne que les pistes d'intégration d'externalités environnementales et solutions de PPP évoquées ci-dessus peuvent être de nature à faire évoluer la situation, dans les pays membres où le profil de risque ou le degré d'avancement de la politique de prévention des risques n'ont pas encore permis de développer des couvertures accessibles et abordables pour les acteurs économiques.

Dans un scénario d'inondation transfrontière par exemple, les particuliers et acteurs économiques potentiellement sinistrés, devraient en effet pouvoir organiser le financement de leur résilience dans des conditions comparables, entre pays membres, à niveaux de dommages potentiels équivalents.

[7]Livre vert, Adaptation au changement climatique en Europe : les possibilités d'action de l'Union européenne, 29/06/07, § 4. L'EUROPE DOIT S'ADAPTER – LES DÉFIS DE LA SOCIETE EUROPEENNE ET DE L'ACTION PUBLIQUE EUROPEENNE, *Comment les Européens doivent-ils s'adapter ?*

Présentation à l'Académie des sciences

par Jean-Dominique Lebreton

Membre de l'Académie des sciences

– 15 décembre 2009 –

Le rapport *Événements climatiques extrêmes* : *réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux* rentre parfaitement à mon sens dans les missions de notre académie, à un moment particulièrement opportun. L'attente du public et des décideurs pour les questions d'environnement n'a en effet jamais été aussi vive. Même si bien sûr l'académie n'a surtout pas à travailler l'œil rivé sur les sondages, il est particulièrement remarquable qu'une enquête du *Monde* daté du 8 décembre indique que nos compatriotes placent au premier rang de leurs interrogations sur les changements planétaires, je cite, « *le renforcement des phénomènes météorologiques extrêmes* », et en troisième rang, je cite également, « *l'augmentation des sécheresses et des inondations* ».

Ces interrogations, ces préoccupations, il convient de les éclairer autant que possible, et c'est à quoi s'attache ce rapport.

Le sujet est délicat : le long terme et le court terme s'opposent sans cesse, et la diversité des situations est immense. À détailler et avertir avec trop de prudence, on se verrait reprocher une application aveugle et obstinée du principe de précaution. À ne pas assez approfondir, on encourt le reproche de négligence. Il suffit de fait qu'un événement rare arrive ou n'arrive pas, ou n'arrive pas au rythme pour lequel on s'était préparé, pour que des commentaires opposés se déploient : on le voit bien à propos du virus H1N1. Le chemin est donc étroit.

Avant de vous retracer brièvement le plan et le contenu de ce rapport, en l'assortissant de commentaires, je voudrais tout d'abord souligner son centrage sur l'essentiel, son regard synthétique, grâce à une rédaction alerte et structurée par quatre annexes et des encarts. Ces encarts sont extrêmement clairs et informatifs, et permettent au discours principal de tenir son fil. Pour les différentes parties, les rédacteurs, mêlant confrères et experts extérieurs, sont donnés, mais vous m'excuserez je pense de ne pouvoir les citer dans ce rapport oral.

L'introduction souligne tout d'abord combien les événements extrêmes font partie de l'histoire de la terre et de l'humanité, et le rapport cite d'ailleurs cette belle phrase de Cuvier : « *la vie a donc souvent été troublée sur cette terre par des événements effroyables* ». Le mot « *effroyable* », pour daté qu'il soit, n'est pas innocent : à la notion d'événement extrême en terme de rareté ou de probabilité d'occurrence, il faut donc ajouter une notion de ressenti et d'impact pour les sociétés humaines. La rareté est d'ailleurs discutée dans le rapport seulement en termes unidimensionnels, mais la multiplicité des facteurs qui peuvent être extrêmes, température, pluviométrie, froid, vent, etc. fait que l'occurrence de l'un ou l'autre des évènements rares peut être assez fréquente. Le paradoxe, bien connu des probabilistes, n'est qu'apparent. C'est donc bien la vulnérabilité des systèmes économiques et sociaux à certains événements plus que leur rareté elle-même qui réclame réflexion.

Le chapitre 1 « *Écosystèmes et événements extrêmes* », s'appuie sur la fonction de stockage du carbone et les autres services. La résilience des écosystèmes aux événements climatiques extrêmes est l'une des clés de la perpétuation de cette fonction de stockage du carbone et des autres services. Les événements extrêmes agissent alors en interaction avec des dégradations antérieures des milieux naturels. L'éradication des mangroves sur les rives de l'océan indien, en induisant des constructions en bord de mer, a été ainsi un facteur terrible d'aggravation des effets des tsunamis, sans que les mangroves en elles-mêmes aient été une protection.

Le chapitre 2 porte sur les assemblages d'espèces vivantes, ce qu'on appelle les communautés végétales et animales, face aux événements climatiques. Le rapport rappelle comment ces assemblages d'espèces sont le produit d'une histoire elle-même marquée par des événements extrêmes. Techniquement, en écologie, on parle de régime de perturbations. La stabilité des assemblages d'espèce sous tel ou tel régime de perturbation suppose une certaine redondance et une flexibilité des fonctions. Il est clairement rappelé que les événements extrêmes sont d'ailleurs indispensables au maintien de certains processus et de certaines espèces, et du point de vue écologique ne sont pas nécessairement des accidents aux conséquences négatives. L'exemple qui me viendrait à l'esprit est celui du maintien dans les communautés végétales forestières d'espèces pionnières, qui réclament des trouées régulières par chablis, mais permettent ensuite un rétablissement rapide des couverts.

Le rapport souligne également de façon judicieuse dans ce chapitre l'importance de la diversité fonctionnelle des espèces présentes, et d'adaptations aux événements extrêmes. Les mécanismes sous-jacents sont encore loin d'être totalement compris, et la recherche est active actuellement pour ordonner la multitude de cas de figures observées. En filigrane à ce thème, l'érosion de la biodiversité, en diminuant la redondance et en appauvrissant la diversité fonctionnelle, constitue une source potentielle d'aggravation des effets des événements extrêmes sur les écosystèmes.

Le chapitre 3 détaille de façon très documentée plusieurs « socio-écosystèmes », terme qui me parait tout à fait approprié pour qualifier des systèmes imbriquant un fonctionnement écologique et des aspects socio-économiques. Le premier est celui des écosystèmes forestiers européens. J'ai été frappé de réaliser, à ma lecture, à propos de la discussion du rôle des tempêtes, que finalement, le rythme, entre guillemets « *naturel* », de tempêtes, c'est-à-dire le régime de perturbation sous-jacent, n'est absolument pas intégré dans les calculs de productivité. L'occurrence de ces événements, pourtant régulière dans le temps long, est nécessairement alors ressentie comme une perte. Le chapitre souligne que des stratégies de prise en compte plus globales sont actuellement développées par des grands organismes comme l'Office national des forêts ou

la Caisse des dépôts. On voit apparaître un thème qui sera repris plus loin, celui de l'adaptation des stratégies de couverture financière des conséquences des événements extrêmes.

Le second cas détaillé dans ce troisième chapitre concerne l'agriculture face au changement climatique, problème brûlant au moment où l'on parle beaucoup « d'intensification écologique » de l'agriculture. La pertinence du sujet pour le thème « évènements extrêmes » est aigüe. En effet, je ne fais que citer le rapport : « *les événements climatiques extrêmes modifient notablement les impacts d'un réchauffement moyen continu* ». Ce sous-chapitre souligne la diversité des situations régionales. Un encart résume les travaux de biotechnologie végétale visant à améliorer la tolérance à la sécheresse.

Enfin, toujours dans ce troisième chapitre, le troisième et dernier cas porte sur les systèmes urbains, et ouvre encore plus pleinement le thème vers la dimension sociétale des événements extrêmes. Ce sous-chapitre reste court et je regrette un peu que le problème de l'urbanisation des pays en voie de développement n'ait pas été abordé. On sait que l'exode rural vers les grandes villes comme Le Caire, Ho Chi Minh ville, Dacca, ou même Casablanca, est alimenté par des événements extrêmes tels qu'inondations ou mauvaises récoltes. Il s'agit à mon sens, sans être particulièrement compétent sur le sujet, d'un des principaux moteurs des instabilités socio-économiques des pays du Sud et donc d'une grande source de préoccupation pour l'avenir.

Le chapitre 4 est consacré à la santé. La première partie développe la relation directe entre événements extrêmes et santé, avec notamment le cas des vagues de chaleur, la seconde celui des maladies transmissibles. Le statisticien appliqué que je suis a vivement apprécié la mesure de l'impact des vagues de chaleur en nombre d'années de vie perdues, qui permet de sortir efficacement du débat stérile entre décès surajoutés ou décès anticipés. Implicitement, ce chapitre s'ouvre sur le cadre conceptuel des invasions biologiques, une maladie émergente infectieuse étant au départ une invasion biologique par un organisme ou un virus pathogène.

Un des grands intérêts à mes yeux de ce chapitre, est qu'il souligne automatiquement, en adoptant un regard unifiant, la similarité des événements extrêmes les plus écologiques, et ceux qui relèvent de l'épidémiologie. Les modes de prévisibilité, en écologie comme en épidémiologie, sont en effet très semblables, avec notamment l'impossibilité de donner une prédiction par une simple trajectoire, ou même par une trajectoire avec un intervalle de confiance. On se trouve le plus souvent en face d'une diversité de trajectoires possibles souvent contrastées, diversité qui bouscule les approches sectorielles, comme le développe plus loin le rapport.

Le cas des répercussions sanitaires des inondations et des cyclones est bien détaillé et constitue un exemple instructif, puisque les répercussions vont de la dégradation des services écologiques – comme la qualité des eaux – à des pathologies de stress. Le rapport souligne à cet égard la grande variabilité de vulnérabilité, entre classes d'âge, entre milieux socioculturels, et entre niveaux de développement bien sûr. Cet aspect-là sera repris ultérieurement, dans un chapitre « Justice et équité ».

Le chapitre 5 est consacré à l'économie, et documente tout d'abord l'augmentation rapide du coût des événements extrêmes, à la fois à cause d'une augmentation de leur fréquence – le rapport cite le cas des ouragans – et à cause de la vulnérabilité croissante des systèmes socio-économiques. L'exemple de l'ouragan Katrina à La Nouvelle-Orléans est bien sûr dans tous les esprits. « *Les événements d'origine naturelle deviennent des catastrophes du fait de l'action humaine* », je cite. Ce chapitre se poursuit par une analyse des impacts macro-économiques et souligne la dissymétrie entre brièveté des événements et étalement des coûts, qui interdit d'assimiler les conséquences économiques des événements extrêmes à de simples interruptions de l'activité économique.

Le rapport souligne les limites du système actuel d'assurance-réassurance et la nécessité d'une réflexion plus approfondie et de mutations face à l'augmentation des coûts.

Le chapitre 6 poursuit la mise en perspective générale. Il s'intitule en effet « *Justice et équité* », et résume les principes qui permettraient de parer à la plus grande vulnérabilité des pays pauvres aux variations climatiques.

Les événements extrêmes sont des amplificateurs des déséquilibres économiques pré-existants. La rapidité nécessaire des restaurations conduit souvent à reconstruire à l'identique, ce qui tend donc à perpétuer des hétérogénéités de vulnérabilité. Le rapport parle ainsi, je cite de « *trappes de pauvreté* », « *en état perpétuel de reconstruction* ». Le changement climatique peut venir comme un facteur aggravant. Le cas du Bangladesh et de l'augmentation des risques d'inondations induits par l'augmentation du niveau de la mer vient à l'esprit. Tout progrès passe inévitablement par une réflexion sur les politiques de coopération.

Le 7e et dernier chapitre, « *Sécurité publique* », se rapproche encore plus nettement de recommandations et souligne la nécessité d'approches systémiques et transversales. C'est ce qui a été réalisé à une certaine échelle en France avec les plans ORSEC et autres plans du même type.

La conclusion souligne la nécessaire intégration des sciences écologiques, des sciences de l'environnement en général, et des sciences de l'homme et de

la société pour traiter ce problème des événements extrêmes. Pour fréquentes qu'elles soient désormais, il est clair que ces tentatives d'intégration pluridisciplinaires n'en sont encore qu'à leurs balbutiements.

Le rapport comporte comme il se doit, en tête, un résumé exécutif d'un peu plus de quatre pages qui souligne l'accélération apparente des événements extrêmes, et l'augmentation marquée des pertes et des coûts. Tout en soulignant qu'une maîtrise absolue est illusoire, ce résumé recommande fermement l'abandon d'approches sectorielles. Il souligne également le lien fort avec les problèmes de viabilité et, passez-moi le terme, de « durabilité » des services écologiques, et d'analyse des partages d'usage – de l'espace, de l'eau et d'autres ressources. Les problèmes de santé sont à eux seuls un domaine ou l'anticipation et la prévention sont en plein développement. Le rapport recommande également que, tout en allant vers une vision globale de la sécurité, les solutions de couverture financière soient réadaptées.

Pour conclure, je voudrais tenter de vous transmettre la vision d'ensemble acquise à la lecture de ce rapport, et redire les points forts qui me semblent émerger. Il s'agit pour moi d'un rapport qui ouvre de nombreuses portes, qui unifie le regard sur des problèmes très divers, avec une pédagogie dans la progression des idées qui va naturellement des événements naturels à la pyramide des conséquences pour les sociétés humaines, sans bien sûr prétendre à aucun moment clore un sujet aussi riche et émergent. Le message qui émerge est qu'il s'agit d'apprendre à mieux vivre avec les risques : l'émergence de systèmes d'alerte doit éviter la négligence, tout en veillant à éviter des fausses alertes démobilisatrices. Je retiendrai également les recommandations de réorganisation des systèmes de couverture financière, et l'énorme besoin de recherches d'interface sur ce que le rapport appelle les socio-écosystèmes, besoins qui doivent nécessairement mobiliser une grande diversité de sciences disons « dures » et les sciences de l'homme et de la société.